

УДК 621.31; 622.692.4

О ВЛИЯНИИ ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА МАГИСТРАЛЬНЫХ НАСОСОВ НА ЦИКЛИЧНОСТЬ НАГРУЖЕНИЯ ТРУБОПРОВОДА

Шабанов В.А.¹, Павлова З.Х., Калимгулов А.Р.

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

Аннотация. В статье исследуется влияние частотно-регулируемого электропривода (ЧРЭП) на снижение числа включений насосных агрегатов на эксплуатируемых нефтепроводах. Рассмотрена методика расчета цикличности нагружения при использовании ЧРЭП, получены формулы для расчета коэффициента снижения цикличности нагружения. Приведены результаты расчета эффективности использования ЧРЭП для технологического участка действующего нефтепровода

Ключевые слова: частотно-регулируемый электропривод, магистральный насос, нефтепровод, циклическая перекачка, цикличность нагружения

В настоящее время регулирование режима перекачки нефти по магистральным нефтепроводам производится подбором числа насосных агрегатов (НА) [1, 2]. При этом регулирование производительности нефтепровода производится ступенчато и не всегда удается обеспечить требуемый суточный объем перекачки при фиксированном числе магистральных насосов. В этом случае заданная производительность нефтепровода обеспечивается методом циклической перекачки, при котором трубопровод последовательно (циклически) работает с разным числом насосов. Недостатком такого способа перекачки является необходимость выполнять большое число включений/отключений НА. При этом металл труб магистральных трубопроводов работает в условиях циклического нагружения от изменения внутреннего давления перекачиваемого продукта [3, 4]. Известно, что более 30 % отказов происходят на трубопроводах, проработавших более 20 лет, что связано с ухудшением их технического состояния и появлением усталостных трещин [5]. Зарождению усталостной трещины может способствовать изменение уровня циклического нагружения в течение срока эксплуатации нефтепровода. Циклирование с малой амплитудой может не оказывать влияние на предел усталости до тех пор, пока нагружение с большой амплитудой не вызовет появление трещины, способной преодолеть микроструктурный барьер и развиваться в дальнейшем при длительном низкоамплитудном нагружении [6]. Регулирование режимов трубопровода с помощью частотного регулирования по сравнению с циклическим методом не требует многочисленных включений/выключений насосов [7, 8]. В статье исследуется влияние частотно-регулируемого электропривода (ЧРЭП) на снижение числа включений/выключений НА на эксплуатируемых нефтепроводах.

При циклической перекачке циклически изменяется производительность нефтепровода. При этом также циклически изменяются давления на входах и выходах нефтеперекачивающих станций (НПС), а также давления во всех других сечениях нефтепровода, в том числе и в опасных сечениях нефтепровода, в которых имеются усталостные тещины. При этом циклическое изменение давления приводит к ускоренному развитию дефекта, что сокращает остаточный ресурс трубы и приводит к необходимости сокращать межремонтный период. Применение ЧРЭП позволяет исключить циклические режимы перекачки или существенно снизить их.

За один цикл нагружения технологического участка внутренним давлением принимается включение любого НА, либо технологическое переключение, сопровождающееся изменением (перепадом) внутреннего давления на выходе НПС свыше 0,2 МПа [9]. Перепадом внутреннего давления ΔP на выходе НПС при включении агрегата (технологическом переключении) считается разность между давлением после включения НА данной НПС и до его включения, округленная до ближайшего значения, кратного 0,2 МПа. Годовая цикличность нагружения участка определяется в относительных единицах. Для этого перепады давления приводятся к нагружению с перепадом 2,0 МПа. Для определения годовой цикличности нагружения технологического участка подсчитывается количество включений всех НА участка с равными ΔP за полный календарный год.

Приведенная годовая цикличность нагружения участка МН (N_{np}) определяется по формуле:

$$N_{np} = \sum_{i=1}^n N_i \cdot \left(\frac{\Delta P_i}{2,0} \right)^{2,2}, \quad (1)$$

где N_i – число включений НА с перепадом внутреннего давления на выходе НПС, равным ΔP_i .

Чем больше значение годовой цикличности нагружения, тем меньше остаточный ресурс трубы. Для каждой трубы технологического участка магистрального нефтепровода остаточный ресурс T_{Ai} (в годах) может быть определен по формуле:

$$T_A = \frac{N_{min} \cdot k}{N_g \cdot m}, \quad (2)$$

где N_{min} – количество циклов развития трещины от ее начального состояния;

k – коэффициент пересчета долговечности;

N_g – прогнозируемая годовая цикличность нагружения участка магистрального нефтепровода;

m – коэффициент запаса прочности по долговечности, может приниматься $m = 10$.

Методика оценки цикличности нагружения при использовании ЧРЭП

При оценке цикличности нагружения принимаются следующие допущения:

а) предполагается, что с помощью ЧРЭП устанавливается требуемая суточная производительность перекачки. При этом не требуется циклическое включение/отключение магистральных насосов, и режим циклического изменения производительности заменяется на режим с постоянной производительностью. Поэтому при использовании ЧРЭП число НА в течение суток не изменяется, и цикличность нагружения в течение суток будет равна нулю;

б) при переходе от одного режима циклического изменения производительности к другому при использовании ЧРЭП выполняются те же переключения, что и при отсутствии ЧРЭП. Поэтому число включений НА при таких переходах при использовании ЧРЭП будет таким же, что и без ЧРЭП;

в) возможность плавного пуска/останова не учитывается, так как они не влияют на давления в установившихся режимах.

При изложенных допущениях цикличность нагружения при использовании ЧРЭП будет равна сумме цикличности нагружения при переходах от одного режима циклического изменения производительности к другому и цикличности нагружения при технологических переключениях (при срабатывании технологического АВР), а также при самозапусках после срабатывания АВР и включения секционного выключателя. Цикличности нагружения при технологических переключениях (при срабатывании технологического АВР) и при самозапусках после срабатывания АВР при использовании ЧРЭП и без ЧРЭП равны. Поэтому при исследовании влияния ЧРЭП на цикличность нагружения их можно не учитывать.

Рассмотрим, как изменится цикличность нагружения при использовании ЧРЭП на примере технологического участка «Ленинск-Нурлино» нефтепровода НКК ОАО «Уралсибнефтепровод». При обработке исходных данных о режимах работы нефтепровода выделяются интервалы времени циклической перекачки, внутри которых при использовании ЧРЭП можно обойтись без переключения (включения/отключения) НА. В качестве примера такие интервалы времени для технологического участка «Ленинск-Нурлино» нефтепровода НКК приведены в табл. 1.

Как видно из табл. 1, в циклической перекачке поочередно участвуют два или три НА. При использовании ЧРЭП можно обойтись без переключений, если в работе постоянно будут три НА, один из которых с ЧРЭП. При этом все режимы, представленные в табл. 1, можно заменить одним режимом с постоянной производительностью. В результате снизится число режимов перекачки за месяц (год), а, следовательно, снизится и число переключений НА при переходе от одного режима к другому. Результаты обработки информации о режимах работы исследуемого технологического участка за месяц приведены в табл. 2.

Таблица 1. Фрагмент сведений о режимах работы нефтепровода

Дата	Технологический режим	Время работы, час	ЛПДС "Ленинск"		НПС "Бердяуш"		НПС "Кропачево"		НПС "Улу-Теляк"	
			Н/А	Рвых, кгс/см ²	Н/А	Рвых, кгс/см ²	Н/А	Рвых, кгс/см ²	Н/А	Рвых, кгс/см ²
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
5	003(Сх1)(009)	10	2п+№1	34,2	№2	32,2	-	12,9	№1	29,9
5	002(Сх1)(002)	14	2п+№1	35,7	№1	38,7	-	24,8	-	27,6
6	002(Сх1)(002)	12	2п+№1	35,8	№1	38,7	-	24,8	-	27,5
6	003(Сх1)(009)	12	2п+№1	34,4	№2	32,1	-	12,8	№1	29,6
7	003(Сх1)(009)	12	2п+№1	34,4	№2	32,6	-	12,8	№1	29,8
7	002(Сх1)(002)	12	2п+№1	35,9	№2	38,8	-	25,0	-	27,7
8	002(Сх1)(002)	6	2п+№1	36,1	№2	39,1	-	24,7	-	27,4
8	003(Сх1)(009)	18	2п+№1	34,5	№2	32,6	-	13,1	№1	29,8
9	003(Сх1)(009)	12	2п+№1	34,5	№2	32,6	-	13,1	№1	29,9
9	002(Сх1)(002)	12	2п+№1	35,6	№2	38,8	-	24,7	-	27,5
10	002(Сх1)(002)	4	2п+№1	36,1	№1	39,1	-	24,8	-	27,6
10	003(Сх1)(009)	20	2п+№1	34,2	№2	32,4	-	13,1	№1	29,7

Таблица 2. Результаты обработки информации по цикличности нагружения

Дата	Режим	Ленинск		Бердяуш		Кропачево		Улу-Теляк	
		Давление на выходе кгс/см ²	НА	Давление на выходе кгс/см ²	НА	Давление на выходе кгс/см ²	НА	Давление на выходе кгс/см ²	НА
12.01.	002 (Сх1)(002)	36,1	№1	39,1	№1	24,6	0	27,3	0
	004 (Сх1)(008)	46,9	№2,3	42,5	№1	20	0	32,4	№1
	Перепад давления, МПа	1,06		0,33		0,45		0,50	
17.01.- 18.01.	003(Сх1)(009)	35,1	№3	32,2	№1	14,7	-	30,4	№1
	004(Сх1)(008)	47,1	№2,3	42,8	№1	19,6	-	33,7	№1
	Перепад давления, МПа	1,18		1,04		0,48		0,32	
19.01.- 20.01.	003(Сх1)(009)	34,4	№1	32,8	№1	13,4	-	31,1	№1
	005(Сх1)(108)	46,9	№2,3	42,9	№4	29,6	№1	40,3	№2
	Перепад давления, МПа	1,23		0,99		1,59		0,90	
29.01.- 30.01.	002(Сх1)(002)	36,2	№3	44,2	№3	28,4	-	30,1	-
	004(Сх1)(008)	46,8	№2,3	42,4	№1	20,2	-	34,3	№1
	Перепад давления, МПа	1,04		0,18		0,80		0,41	

В табл. 2 учтены только переходы от одного режима циклического изменения производительности к другому, то есть переходы между двумя режимами с разным числом включенных НА, один из которых снабжен ЧРЭП. Изменения давления определялись только при включении НА. Для определения приведенной годовой цикличности нагружения необходимо определить количество включений НА каждой НПС за полный календарный год. Согласно [9] за один цикл нагруже-

ния технологического участка МН внутренним давлением принимается включение любого НА, либо технологическое переключение на технологическом участке МН, сопровождающееся изменением (перепадом) внутреннего давления на выходе НПС свыше 0,2 МПа. Поэтому все перепады давления после обработки исходных данных за полный календарный год были приведены к значениям, кратным 0,2 МПа. Результаты расчета приведенной годовой цикличности при использовании ЧРЭП для технологического участка Ленинск - Нурлино приведены в табл. 3.

Таблица 3. Результаты расчета приведенной цикличности нагружения при использовании ЧРЭП

Наименование НПС	Количество включений насосных агрегатов с перепадом внутреннего давления ΔP (МПа), равным:																Приведенная цикличность для участка между соседними НПС, $N_{чрп}$
	0,2	0,4	0,6	0,8	1	1,2	1,4	1,6	1,8	2	2,2	2,4	2,8	3,2	3,4	3,6	
Ленинск	20	11	0	0	5	23	5	14	0	0	0	1	0	0	2	1	31
Бердяуш	12	5	9	14	18	7	8	3	3	1	1	2	2	2	0	1	35
Кропачево	18	12	14	15	7	6	3	7	2	0	1	0	0	0	0	0	15
Улу-Теляк	5	10	15	12	15	11	10	3	2	5	1	0	0	0	0	0	24
ИТОГО	55	38	38	41	45	47	26	27	7	6	3	3	2	2	2	2	

Определение увеличения остаточного ресурса при использовании ЧРЭП

Назовем отношение годовой приведенной цикличности нагружения без ЧРЭП N_{np} к годовой приведенной цикличности нагружения при использовании ЧРЭП коэффициентом снижения цикличности нагружения

$$k_{с.ц.} = \frac{N_{np}}{N_{чрп}}. \quad (3)$$

Результаты расчетов коэффициента снижения цикличности нагружения для участков между соседними НПС представлены в табл. 4.

Таблица 4. Результаты расчетов увеличения остаточного ресурса

Наименование н/п	Наименование НПС	N_{np}	$N_{чрп}$	Коэффициент снижения цикличности нагружения
НKK	ЛПДС «Ленинск»	68	31	2,15
	НПС «Бердяуш»	77	35	2,17
	НПС «Кропачево»	45	15	2,92
	НПС «Улу-Теляк»	73	24	3,04

Согласно формуле (2) остаточный ресурс трубы участка магистрального нефтепровода обратно пропорционален годовой цикличности нагружения. Тогда остаточный ресурс трубы при ЧРЭП $T_{чрп}$ при известном остаточном ресурсе в режимах без ЧРЭП T_A может быть найден по формуле

$$T_{чрп} = T_A \cdot \frac{N_{np}}{N_{чрп}}, \quad (4)$$

или с учетом формулы (3) остаточный ресурс трубопровода при использовании ЧРЭП будет

$$T_{чрп} = k_{с.ц.} \cdot T_A.$$

Оценка экономической эффективности использования ЧРЭП по критериям снижения цикличности нагружения и увеличения остаточного ресурса.

Увеличение остаточного ресурса труб участка МН позволяет увеличить интервалы между ремонтными работами. При этом ремонтные работы на участке МН смещаются на последующие периоды времени и их количество и соответственно затраты на ремонт в год уменьшаются в $k_{с.ц.}$ раз, где $k_{с.ц.}$ определяется по выражению (3).

Экономическая эффективность использования ЧРЭП на нефтепроводе технологического участка складывается из экономической эффективности каждого участка между соседними станциями. Экономическая эффективность использования ЧРЭП между соседними станциями технологического участка $\mathcal{E}_{чрпi}$ может быть определена из выражения:

$$\mathcal{E}_{чрпi} = \mathcal{Z}_{y\partial} \cdot \left(1 - \frac{1}{k_{с.ц.i}} \right), \quad (5)$$

где $\mathcal{Z}_{y\partial}$ – удельные затраты на ремонт одного километра дефектных труб; $k_{с.ц.i}$ – коэффициент снижения годовой цикличности нагружения участка нефтепровода между соседними станциями при использовании ЧРЭП.

Удельные затраты на ремонт одного километра трубы магистрального нефтепровода определяются по выражению

$$\mathcal{Z}_{y\partial} = \mathcal{Z}_T / L, \quad (6)$$

где \mathcal{Z}_T – среднегодовые затраты на ремонт трубопровода технологического участка; L – длина технологического участка.

Результаты расчетов экономической эффективности ЧРЭП по выражению (5) при $\mathcal{Z}_{y\partial} = 138,5$ тыс. руб./км приведены в табл. 5.

Таблица 5. Результаты расчета экономической эффективности использования ЧРЭП

НПС1-НПС2	Протяженность, км	Затраты на ремонт без ЧРЭП, тыс. руб.	$k_{с.ц.}$	Экономия с ЧРЭП, тыс.руб.
Ленинск - Бердяуш	61,25	8480	2,15	4540
Бердяуш - Кропачево	89	12330	2,17	6640
Кропачево - Улу-Теляк	75	10390	2,92	6840
Улу-Теляк - Нурлино	110,06	15240	3,04	10230
ИТОГО	335,31	46440	-	28250

Выводы

1. Применение ЧРЭП позволяет снизить цикличность нагружения нефтепровода. Для исследуемого технологического участка цикличность нагружения трубы при использовании ЧРЭП снижается от 2,15 раз до 3,04 раз.

2. Результаты расчета эффективности использования ЧРЭП для технологического участка действующего нефтепровода за исследуемый интервал времени показали, что за счет увеличения остаточного ресурса нефтепровода при использовании ЧРЭП экономический эффект составляет 28 250 тыс.руб, что составляет 61 % от фактических затрат на ремонт при перекачке без использования ЧРЭП.

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. Уфа: изд-во УГНТУ, 2005. 81 с.
3. Гутман Э.М., Амосов Б.В., Худяков М.А. Малоцикловая коррозионная усталость трубной стали при эксплуатации магистральных нефтепроводов // Строительство трубопроводов. 1978. № 4. С. 25 - 30.
4. Волский М.И., Аистов А.С., Гусенков А.П. и др. Прочность труб магистральных нефте- и продуктопроводов при статическом и малоцикловом нагружении // Нефтяная промышленность. Сер. Транспорт и хранение нефти и нефтепродуктов: Обзор. Информ. М.: ВНИИОЭНГ, 1979. 55 с.

5. Худяков М.А., Муфтахов М.Х., Бердин В.К., Закирничная М.М. Влияние ликвационной полосы на распределение напряжений в стене трубы // Электронный научный журнал "Нефтегазовое дело". 2006. №2. 12 с.

URL: http://www.ogbus.ru/authors/Hudyakov/Hudyakov_1.pdf

6. Баширов И.В. Разрушение технологических трубопроводов при одновременном воздействии циклических и вибрационных нагрузок, на резонансной частоте // Электронный научный журнал "Нефтегазовое дело". 2012. №4. С. 370-377.

URL: http://www.ogbus.ru/authors/BashirovIV/BashirovIV_1.pdf

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

8. Шабанов В.А., Бондаренко О.В. Целевые функции и критерии оптимизации перекачки нефти по нефтепроводам при частотно-регулируемом электроприводе магистральных насосов // Электронный научный журнал "Нефтегазовое дело". 2012. №4. С. 10-17.

URL: http://www.ogbus.ru/authors/Shabanov/Shabanov_12.pdf

9. РД-23.040.00-КТН-265-10. Оценка технического состояния магистральных трубопроводов на соответствие требованиям нормативно-технических документов.

ABOUT INFLUENCE OF THE FREQUENCY-ADJUSTABLE ELECTRIC DRIVE OF THE MAIN PUMPS ON CYCLIC LOADING OF THE PIPELINE

V.A. Shabanov¹, Z.H. Pavlova, A.R. Kalimgulov

Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

e-mail: ¹ShabanovVA1@yandex.ru

Abstract. *In article influence of the frequency-adjustable electric drive on decrease in number of turning on of pump units on maintained oil pipelines is investigated. The design procedure of recurrence of loading is considered when using frequency-adjustable electric drive, formulas for calculation of factor of decrease in recurrence of loading are received. Results of calculation of efficiency of use of frequency-adjustable electric drive for the operating oil pipeline are given*

Keywords: *frequency-adjustable electric drive, main pump, oil pipeline, cyclic transfer, recurrence of loading*

References

1. 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.
2. 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.
3. Gutman E.M., Amosov B.V., Khudyakov M.A. Malotsiklovaya korrozionnaya ustalost' trubnoi stali pri ekspluatatsii magistral'nykh nefteprovodov (Low-cycle corrosion fatigue of steel pipe at operating trunk pipelines), *Stroitel'stvo truboprovodov*, 1978, Issue 4, pp. 25 - 30.
4. Volskii M.I., Aistov A.S., Gusenkov A.P. i dr. Prochnost' trub magistral'nykh nefte- i produktprovodov pri staticheskom i malotsiklovom nagruzhenii (Strength pipes of oil and product pipelines in static and low-cycle loading), in *Neftyanaya promyshlennost'. Ser. Transport i khranenie nefi i nefteproduktov: Obzor. Inform. (Petroleum Engineering. Review information series "Transport and storage of oil and petroleum products")*. Moscow, VNIIOENG, 1979. 55 p.
5. Khudyakov M.A., Muftakhov M.Kh., Berdin V.K., Zakirnichnaya M.M. Vliyanie likvatsionnoi polosy na raspredelenie napryazhenii v stene truby (Effect of segregation streamer on the stress distribution in the pipe wall), *Electronic scientific journal "Neftegazovoe delo - Oil and Gas Business"*, 2006. Issue 2. 12 p.
http://www.ogbus.ru/authors/Hudyakov/Hudyakov_1.pdf

6. Bashirov I.V. Razrushenie tekhnologicheskikh truboprovodov pri odnovremennom vozdeistvii tsiklicheskikh i vibratsionnykh nagruzok, na rezonansnoi chastote (The piping destruction process by simultaneous cyclic and vibration loads at resonance), *Electronic scientific journal "Neftegazovoe delo - Oil and Gas Business"*, 2012, Issue 4, pp. 370-377. http://www.ogbus.ru/authors/BashirovIV/BashirovIV_1.pdf

7. Shabanov V.A., Kabargina O.V. Perspektivy ispol'zovaniya chastotno-reguliruemogo elektroprivoda magistral'nykh nasosov na NPS (Prospects for using variable-frequency electric drives of main pumps at oil pumping stations). Ufa: UGNTU, 2010. 63 p.

8. Shabanov V.A., Bondarenko O.V. Tselevye funktsii i kriterii optimizatsii perekachki nefti po nefteprovodam pri chastotno-reguliruемом elektroprivode magistral'nykh nasosov (Objective functions and the optimization criteria pumping oil by pipeline with variable frequency drives main pumps), *Electronic scientific journal "Neftegazovoe delo - Oil and Gas Business"*, 2012, Issue 4, pp. 10-17. http://www.ogbus.ru/authors/Shabanov/Shabanov_12.pdf

9. RD-23.040.00-KTN-265-10. Otsenka tekhnicheskogo sostoyaniya magistral'nykh truboprovodov na sootvetstvie trebovaniyam normativno-tekhnicheskikh dokumentov (Assessment of technical state of pipelines for compliance with normative technical documents).