DOI: *10.25515/PMI.2017.5.582*

УДК 622.276.53.054.2

ОЦЕНКА НАГРУЖЕННОСТИ БАЛАНСИРНЫХ СТАНКОВ-КАЧАЛОК ПО ПАРАМЕТРАМ ПИТАНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Д.И.ШИШЛЯННИКОВ, А.А.РЫБИН
Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

Представлены результаты экспериментальных исследований по оценке нагруженности балансирных станков-качалок (СК) штанговых скважинных насосных установок (ШСНУ). Отмечается, что ключевым фактором, оказывающим наиболее существенное влияние на наработку ШСНУ на отказ, является уравновешенность балансирного СК, определяющая величину удельных энергозатрат на подъем пластовой жидкости и уровень динамических нагрузок на узлы станка. Обоснована актуальность использования программно-регистрирующих комплексов оценки нагруженности узлов насосных установок нефтяных промыслов. Описан принцип действия и конструкция программно-регистрирующего комплекса «АКД-СК». Доказана перспективность применения способа приборного контроля параметров работы и оценки технического состояния ШСНУ на основе анализа величины и характера изменения нагрузок приводных электродвигателей, определяемых посредством регистрации мгновенных значений потребляемых мощностей. Изложены основные положения методики анализа ваттметрограмм приводных двигателей ШСНУ. Описан характер проявления основных дефектов погружных насосов и балансирных СК. Представлены результаты опытно-промышленных испытаний балансирных СК, оснащенных перспективными вентильными электродвигателями и интеллектуальными станциями управления. Доказано, что использование вентильных двигателей позволяет снизить удельные энергозатраты на подъем пластовой жидкости, что повышает эффективность работы ШСНУ.

Однако наличие переходных процессов и генераторных режимов работы вентильных двигателей способствует возникновению значительных динамических нагрузок, которые вследствие жесткой посадки ротора вентильного двигателя на вал редуктора негативно влияют на ресурс подшипников редуктора станка-качалки. Доказано, что отсутствие у испытываемых вентильных двигателей собственных подшипниковых опор обусловливает высокую вероятность заклинивания двигателя при нарушении работы подшипников и появлении радиальных биений на приводном валу редуктора СК.

***Ключевые слова*:** штанговая скважинная насосная установка, станок-качалка, нагруженность, балансировка, электропривод, программно-регистрирующий комплекс, ресурс

Как цитировать эту статью: Шишлянников Д.И. Оценка нагруженности балансирных станков-качалок по параметрам питания электропривода / Д.И.Шишлянников, А.А.Рыбин // Записки Горного института. 2017. Т. 227. С. 582-588. DOI: 10.25515/PMI.2017.5.582

Введение. Для нефтедобывающих предприятий актуальными остаются задачи обеспечения надежной и эффективной работы насосного оборудования нефтепромыслов, снижения затрат на его эксплуатацию, обслуживание и ремонт. Решение задач повышения эффективности использования насосных установок возможно посредством применения автоматизированных систем контроля их эксплуатационной нагруженности и оценки технического состояния. В состав таких систем должны входить методики анализа регистрируемых данных, алгоритмы предотвращения аварийных ситуаций, оповещения о недопустимом развитии событий с формированием соответствующих конкретной ситуации технических решений или рекомендаций, на основании которых могут быть предприняты необходимые действия [8-9, 16].

В настоящее время на нефтепромыслах России и стран СНГ подавляющее большинство нефтяных скважин эксплуатируется с использованием ШСНУ, оснащенных механическим приводом – балансирными СК. Конструкция установок принципиально не менялась более 40 лет.

Достоинства ШСНУ с механическим приводом:

– эксплуатация в течение длительного периода;

– возможность использования штанговых насосов на малодебитных скважинах при осложненных геологических условиях (большое количество абразивных частиц, высокая обводненность, коррозионная активность среды и т.д.);

– простота конструкции устройства и обслуживания.

Однако высокая аварийность ШСНУ, обусловленная значительными динамическими составляющими, постоянно меняющимися внешними нагрузками, подверженностью узлов СК неблагоприятному воздействию окружающей среды, дефектами монтажа и ТО, эксплуатацией СК сверх нормативных сроков, ведет к увеличению эксплуатационных затрат и понижению рентабельности процесса нефтедобычи [4].

DOI: 10.25515/PMI.2017.5.582

Следует отметить, что одним из ключевых факторов, оказывающих существенное влияние на наработку ШСНУ на отказ, является уравновешенность СК, определяющая уровень динамических нагрузок на узлы станка и величину удельных энергозатрат на подъем пластовой жидкости. В настоящее время на нефтепромыслах России балансировка СК осуществляется, как правило, посредством использования токовых клещей, контролирующих величину действующего тока в обмотках статора асинхронного электродвигателя. Поскольку обычно приводные двигатели СК в рабочем режиме недогружены, то в обмотках двигателей преобладают реактивные составляющие мощности, не связанные с нагрузкой, что обусловливает низкую эффективность балансировки СК по действующим токам. По данным подрядных организаций, осуществляющих технический сервис ШСНУ, на промыслах России неправильно отбалансировано около 65 % имеющегося парка СК [7, 10-11, 16].

Оценка нагруженности СК с асинхронным электроприводом. Простота и надежность для автоматических систем контроля параметров работы насосных установок является неотъемлемым фактором ввиду сложных условий функционирования оборудования, ценовых рамок (конкурентоспособность, рентабельность), взаимного взаимодействия элементов ШСНУ.

Анализ величины и характера изменения внешних нагрузок, определяемых замером мощностей, потребляемых электродвигателями балансирных СК, является одним из наиболее перспективных способов приборного контроля и оценки технического состояния ШСНУ [7, 12, 14-15].

Сотрудниками ООО НПП «РОС» (г. Пермь) разработан и серийно производится программно-регистрирующий комплекс «АКД-СК», предназначенный для непрерывного мониторинга СК по электрическим параметрам (рис. 1).

В комплекс «АКД-СК» входят следующие элементы:

1) контроллер с блоком световой индикации;

2) токоизмерительные клещи;

3) отметчик магнитного типа.

Комплекс устанавливается в станцию управления СК, имеет коннектор *RS* 482 для подключения в операторскую сеть. Дополнительной опцией возможно подключение блока для беспроводной передачи данных от контроллера в сеть, на ноутбук или планшет [5]. Для питания комплекса и регистрации мгновенных значений напряжения, потребляемого приводным двигателем СК, соединительный кабель питания контроллера заводится через разъем XP3 с одной из входных фаз (например, фаза А) магнитного пускателя и шины заземления. Токоизмерительные клещи устанавливаются на один из фазовых проводов, идущих с выхода маг-

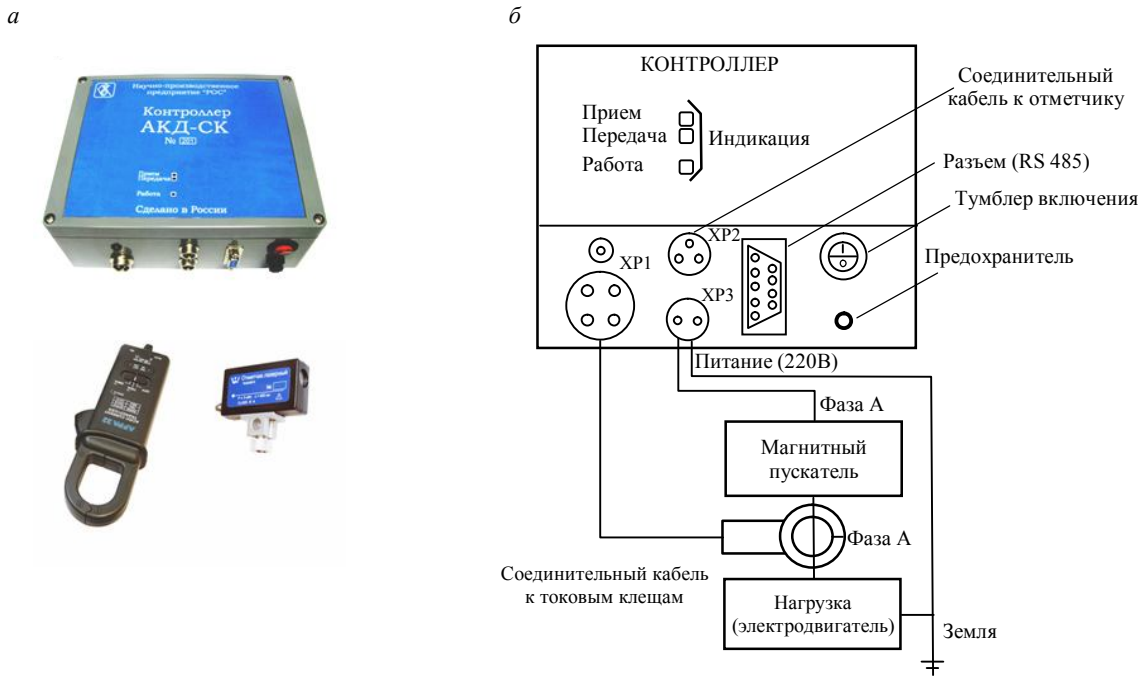


Рис.1. Комплекс «АКД-СК»: *а* – внешний вид; *б* – структурная схема

DOI: 10.25515/PMI.2017.5.582

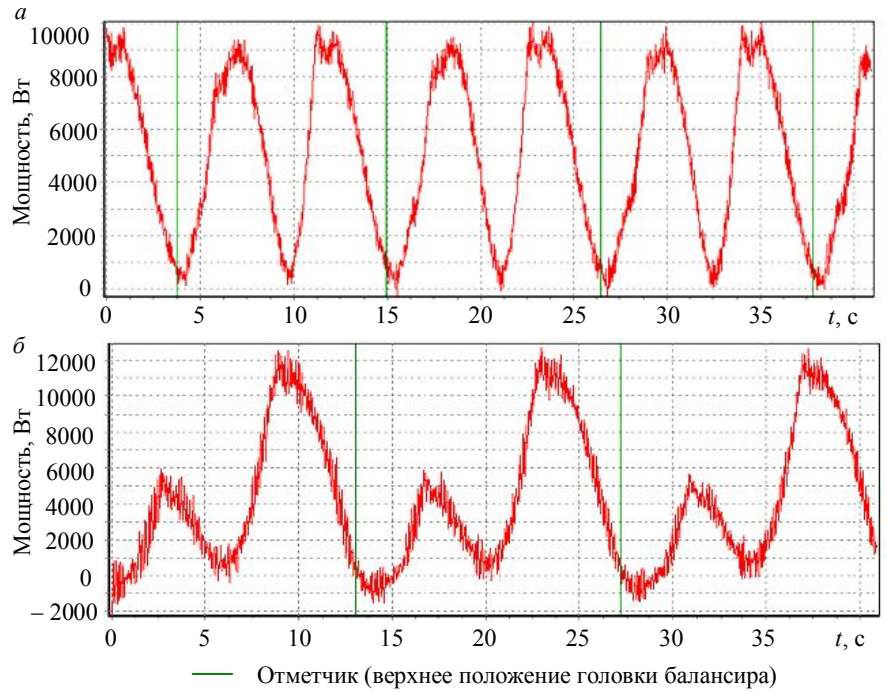


Рис.2. Ваттметрограммы: *а* – полностью уравновешенного СК (техническое состояние хорошее); *б* – неуравновешенного СК (груз мал)

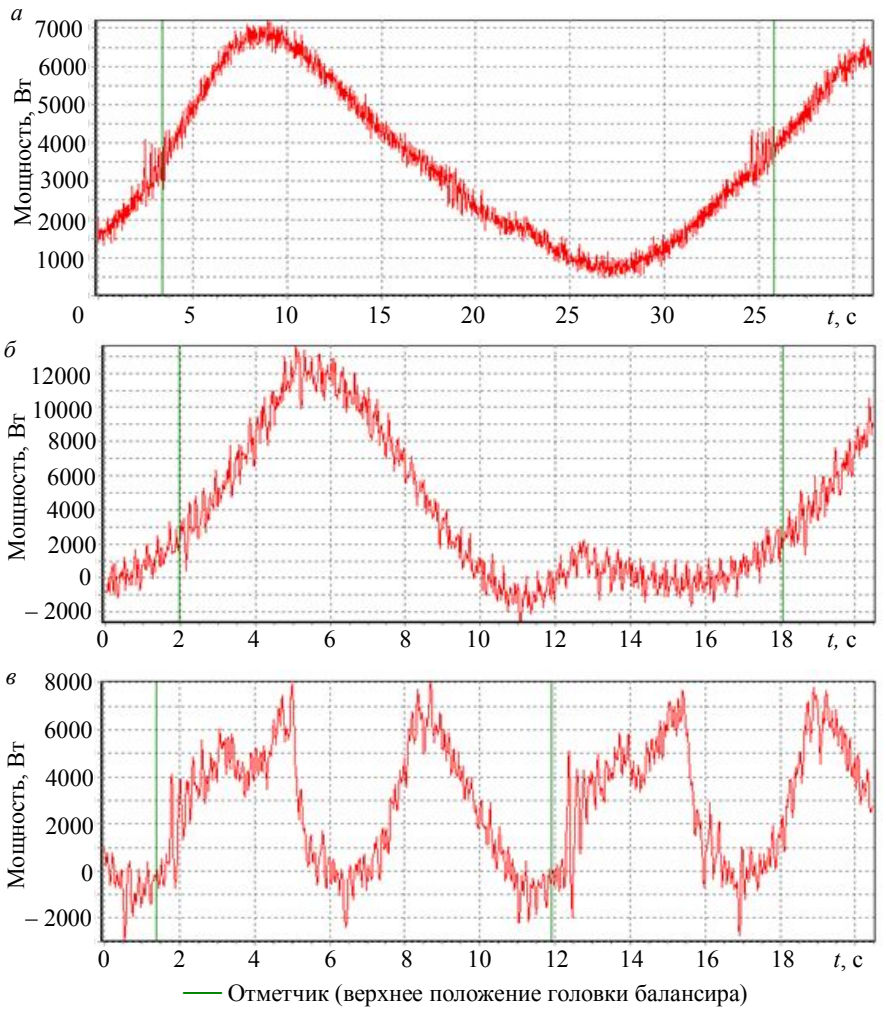


Рис.3. Диагностические признаки дефектов штанговых скважинных насосов на ваттметрограммах СК: *а* – обрыв штанг; *б* – дефект нагнетательного клапана; *в* – дефект приемного клапана

нитного пускателя, и подключаются к контроллеру через разъем XP1. Фиксация нижнего (верхнего) положения головки балансира СК осуществляется посредством использования отметчика магнитного типа, который устанавливается на раму СК рядом с выходным валом редуктора и подключается к контроллеру соединительным кабелем через разъем XP2. При этом на выходной вал редуктора монтируется магнит в месте, соответствующем нижнему (верхнему) положению головки балансира СК [7].

Визуализация и обработка ваттметрограмм (рис.2) осуществляются с использованием специализированного программного обеспечения, установленного на персональных компьютерах (и (или) ноутбуках) сотрудников инженерно-технических служб нефтепромысла [7].

Ваттметрограмма полностью уравновешенного и исправного СК (рис.2, *а*) на каждый полный ход штока скважинного насоса имеет два полупериода с выраженными пиками, соответствующими горизонтальным положениям кривошипа. Согласно установленным нормативам, разница величин максимальных значений мощности, потребляемых приводным двигателем СК при опускании и подъеме штока скважинного насоса, не должна превышать 10 %. Недостаточная величина противомомента, создаваемого кривошипными грузами при опускании колонны штанг скважинного насоса при неуравновешенном СК (рис.2, *б*), обусловливает переход приводного двигателя в генераторный режим работы, а рабо-

DOI: 10.25515/PMI.2017.5.582

чий ход штока насоса сопровождается повышенными нагрузками на редуктор и двигатель СК. Следствием указанных процессов является увеличение удельных энергозатрат на подъем пластовой жидкости, высокая динамика и превышение нормативных значений нагрузок на элементы СК [7].

Анализ полученных ваттметрограмм позволяет диагностировать наиболее распространенные дефекты штанговых скважинных насосов (рис.3). Диагностическим признаком обрыва колонны штанг ШСНУ является увеличение пиковых значений активной мощности, потребляемой двигателем при опускании головки балансира и отсутствие на ваттметрограмме полупериода нарастания мощности при подъеме балансира (рис.3, *а*), что обусловливается отсутствием внешней нагрузки, создаваемой при подъеме столба пластовой жидкости из скважины. Схожим образом проявляются дефекты нагнетательного клапана погружного насоса: существенное снижение мощности, потребляемой двигателем при подъеме поршня, обусловлено утечкой большей части пластовой жидкости через неисправный нагнетательный клапан поршня обратно в цилиндр насоса и, как следствие, значительным снижением нагрузки в точке подвеса колонны штанг (рис.3, *б*). Неравномерность нарастания нагрузки при опускании колонны штанг, увеличение динамических составляющих силовых воздействий на привод ШСНУ является признаком неисправности приемного клапана скважинного насоса (рис.3, *в*) [7].

Оценка нагруженности СК, оснащенных вентильными двигателями. Одним из путей снижения удельных энергозатрат и автоматизации балансирных СК является использование вентильных электродвигателей (рис.4) с возбуждением от постоянных магнитов. С 2015 г. на нефтепромыслах ООО «ЛУКОЙЛ-ПЕРМЬ» осуществляется опытно-промышленная эксплуатация перспективных ВД разработки ООО «ЭПУ-ИТЦ» (г. Москва).

Конструктивно вентильный двигатель (ВД), как и любой электродвигатель, состоит из статора и ротора (рис.4, *а*). Статор – неподвижная часть электродвигателя – содержит обмотки, служащие для создания вращающегося электромагнитного поля внутри двигателя. Статор ВД монтируется непосредственно на редуктор СК, на крепеж крышки подшипника входного вала редуктора. Ротор – вращающаяся часть электродвигателя – устанавливается на входной вал редуктора СК и не имеет собственных подшипниковых опор. На поверхности ротора крепятся постоянные магниты, количество которых определяет число полюсов ВД. По сравнению с асинхронными электродвигателями ВД характеризуются большими значениями КПД и коэффициента мощности, меньшими тепловыми потерями, массами и габаритными размерами.

Работа вентильных двигателей ШСНУ осуществляется с использованием станций управления типа *VLT SALT*, принцип действия которых основан на реализации программных алгоритмов, заложенных в память технологического контроллера. Станция управления контролирует текущее состояние ВД, величину и характер изменения нагрузки на валу двигателя, формирует соответствующие заданию и текущим условиям значения действующего напряжения и тока, фазу между

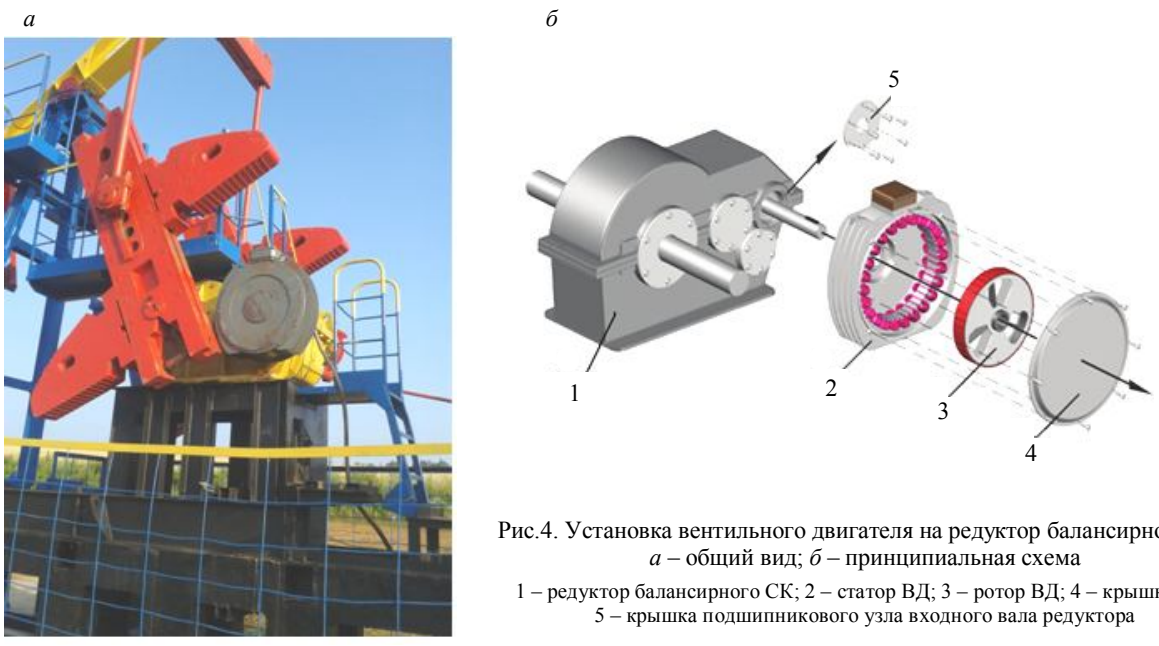


Рис.4. Установка вентильного двигателя на редуктор балансирного СК:
а – общий вид; *б* – принципиальная схема
1 – редуктор балансирного СК; 2 – статор ВД; 3 – ротор ВД; 4 – крышка ВД; 5 – крышка подшипникового узла входного вала редуктора

DOI: 10.25515/PMI.2017.5.582

напряжением и током, частоту питающего напряжения. Данный процесс во время работы ШСНУ реализуется непрерывно: от цикла к циклу, в соответствии с заложенным алгоритмом технологический контроллер адаптирует задание к режиму минимального энергопотребления при оптимальной производительности установки [1-3].

Крепление ротора ВД на валу редуктора позволяет устранить проскальзывания и потери, возникающие при работе клиноременной передачи. Совместное использование ВД с интеллектуальной станцией управления обеспечивает возможность регулирования параметров ШСНУ в широких пределах: частота вращения вала двигателя уменьшается в крайних точках хода штока, контролируются предельные нагрузки и осуществляется регулировка скорости движения на участках подъема и опускания штанг (реализуется четырехпериодное управление).

Сравнительные испытания балансирных СК, оснащенных вентильным двигателем ВДПМ-СК-22В и асинхронным электродвигателем 4АМИ200М6У3/22/980 с клиноременной передачей, проводились на скважине №1001 Западного месторождения ЦДНГ-7 ООО «ЛУКОЙЛ-ПЕРМЬ». Испытания проводились в два этапа с использованием станции управления *Danfoss-SALT*, станка-качалки СКДР-8-3 с редуктором ЦЗНШ-450-40. На первом этапе станок-качалка оборудовался вентильным двигателем, осуществлялась настройка станции управления, устанавливались заданные технические параметры работы ШСНУ. Методикой исследования предусматривалось проведение ежедневных замеров энергопотребления и дебита скважины. На втором этапе проводился демонтаж вентильного двигателя и установка на СК шкивов клиноременной передачи и асинхронного двигателя. Программа испытаний повторялась в полном объеме с идентичными режимными параметрами работы ШСНУ [6].

Результаты испытаний показали снижение удельных энергозатрат при использовании ВД на 13 % (см. таблицу). Исключение из кинематической цепи СК клиноременной передачи и применение интеллектуальных станций управления типа *VLT SALT* обеспечивает возможность регулирования параметров работы ШСНУ в широких диапазонах с высокими быстродействием и точностью.

Результаты сравнительных испытаний приводов ШСНУ (СКДР-8-3) на Западном месторождении (скважина № 1001)

Параметры	Тип двигателя	
	4АМИ200М6У3	ВДПМ-СК-22В
Мощность двигателя, кВт	22	22
Частота вращения вала двигателя, об/мин	975	450
Длина хода штока, м	3	3
Число двойных ходов штока, мин$^{-1}$	5,6	5,6
Длительность замеров, сут	12	14
Удельное потребление электроэнергии, кВт·ч/м^3	5,4	4,7
Изменение удельного энергопотребления, %	100	87

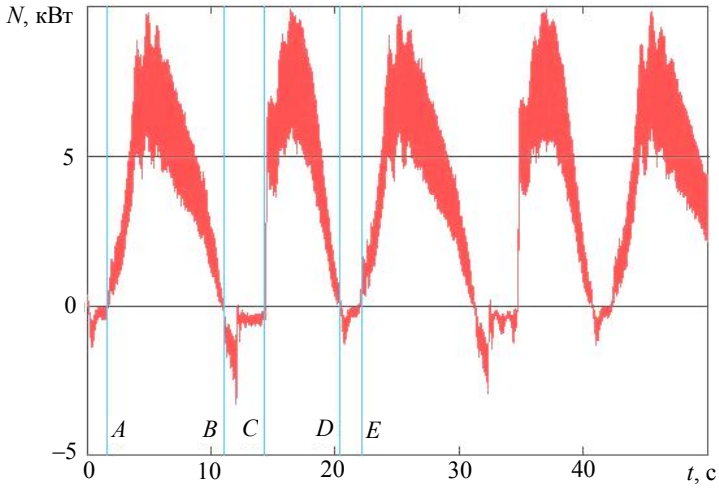


Рис.5. График изменения мощности, потребляемой вентильным двигателем ВДПМ-СК-22В при работе станка-качалки: *AB* – подъем балансира; *BC* и *DE* – переходные процессы в крайних положениях балансира; *CD* – опускание балансира

Однако наряду с указанными достоинствами следует отметить и недостатки, выявленные в ходе опытно-промышленных испытаний вентильных двигателей: значительная стоимость интеллектуальной станции управления типа *VLT SALT* и ВД; сложность настройки станции управления; малая наработка ВД на отказ. Сотрудники инженерных и сервисных служб нефтепромысла предположили, что низкие показатели надежности испытываемого ВД обусловлены, в первую очередь, выбранными параметрами режима работы. Однако подтверждение данной гипотезы потребовало проведения дополнительных изысканий.

Исследования по оценке нагруженности узлов балан-

DOI: 10.25515/PMI.2017.5.582

сирных СК, оснащенных перспективными вентильными двигателями, выполнены сотрудниками кафедры «Горная электромеханика» Пермского национального исследовательского политехнического университета с использованием переносного программного комплекса «ВАТУР», аналогичного вышеописанному программно-регистрирующему комплексу АКД-СК [13-15].

Анализ полученных сигналов мощности (рис.5) показывает, что реализация алгоритма четырехпериодного управления ВД обусловливает возникновение значительных динамических нагрузок на узлы станка-качалки и в особенности на подшипниковые опоры редуктора. Подъем балансира СК осуществляется при пониженной скорости вращения ротора двигателя с целью уменьшения пиковых нагрузок и более полного заполнения скважинного насоса пластовой жидкостью (период *AB*, рис.5). При опускании балансира и подъеме кривошипа скорость вращения ротора двигателя увеличивается за счет изменения частоты питающего напряжения станцией управления *VLT SALT* (период *CD*, рис. 5).

Увеличение длительности периода *AB* и уменьшение *CD* в каждом цикле работы станка-качалки позволяет снизить удельные энергозатраты на подъем пластовой жидкости, что повышает эффективность работы ШСНУ. В то же время крайние положения балансира характеризуются протеканием переходных процессов (периоды *BC* и *DE*) и генераторными режимами работы двигателя. На участках *BC* и *DE* (рис.5) приводной двигатель является источником динамических нагрузок, которые вследствие жесткой посадки ротора ВД на вал редуктора действуют, в первую очередь, на подшипниковые опоры редуктора СК. Отсутствие у испытываемых ВД собственных подшипниковых опор обусловливает высокую вероятность заклинивания двигателя при нарушении работы подшипников и появлении радиальных биений на приводном валу редуктора СК.

Выводы. Постоянный учет сигналов активных мощностей, потребляемых приводными электродвигателями ШСНУ, позволяет получать актуальную и достоверную информацию об эксплуатационных параметрах штанговой скважинной насосной установки, и на основе полученных данных наиболее эффективно и надежно контролировать нагруженность узлов ШСНУ, качественно выполнять балансировку СК. За счет этого уменьшаются энергозатраты на подъем пластовой жидкости и динамические нагрузки на детали ШСНУ. Изучение информации о величине и характере изменения нагруженности приводных электродвигателей СК позволяет оценивать техническое состояние элементов ШСНУ. Результаты исследований, представленные в данной статье, доказывают перспективность разработки средств контроля технического состояния оборудования, осуществляющих оценку величины и характера изменения мощностей, потребляемых приводными электродвигателями.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бестрансмиссионный энергоэффективный привод редуктора станка-качалки / О.И.Усачев, М.Я.Гинзбург, А.Е.Егнус, В.И.Павленко // Нефтегазовая вертикаль. 2014. № 17-18. С. 100-103.

2. *Иванов С.Л.* Повышение ресурса трансмиссий горных машин на основе оценки энергонагруженности их элементов / Санкт-Петербургский горный институт. СПб, 1999. 92 с.

3. Методика диагностирования механизмов с электроприводом по потребляемому току / А.В.Барков, Н.А.Баркова, А.А.Борисов, В.В.Федорищев, Д.В.Грищенко / НОУ «Севзапучцентр». СПб, 2012. 67 с.

4. *Молчанов А.Г.* Машины и оборудование для добычи нефти и газа. М.: Издательский дом «Альянс», 2010. 588 с.

5. Паспорт «Стационарный программно-аппаратный комплекс АКД-СК» / НПП «РОС». Пермь, 2015. 13 с.

6. Результаты опытно-промышленных испытаний перспективных приводов штанговых скважинных насосных установок / И.И.Мазеин, А.Н.Устинов, М.В.Тяктев, А.А.Рыбин, Д.И.Шишлянников, М.М.Тяктев // Горное оборудование и электромеханика. 2016. № 9. С. 8-14.

7. Способ контроля параметров работы и технического состояния штанговых скважинных насосных установок / Н.Н.Софьина, Д.И.Шишлянников, К.А.Корнилов, Е.О.Вагин // Master's Journal. 2016. № 1. С. 247-257.

8. *Burkov P.V.* Justifying a method of balancing crank-and-rod mechanism of mining roadheader / P.V.Burkov, S.P.Burkova, V.Y.Timofeev // Applied Mechanics and Materials. 2014. Vol. 682. P.270-275. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.682.270.

9. Effects of the rotation speed ratio of double eccentricity bushings on rocking tool path in a cold rotary forging press / L.Dong, X.Han, L.Hua, J.Lan, W.Zhuang // Journal of Mechanical Science and Technology. 2015. Vol. 29. Iss. 4. P.1619-1628. DOI: 10.1007/s12206-015-0333-5.

10. Ways of improvement of reservoir completion efficiency / I.N.Gaivoronskiy, V.I.Kostitsyn, A.D.Savich, I.A.Chernykh, A.V.Shumilov // Neftyanoe Khozyaystvo – Oil Industry. 2016. Iss. 10. P.62-65.

DOI: *10.25515/PMI.2017.5.582*

11. *Kostyukov V.N.* Real-time condition monitoring of equipment // 7th International Conference on Condition Monitoring and Machinery Failure Prevention Technologies. 2010. Vol. 1. P. 239-246.

12. *Kostyukov V.N.* Real-time condition monitoring of thermal power plants feed-pumps by rolling bearings supports vibration / V.N.Kostyukov, E.V.Tarasov // Journal of Physics: Conference Series. 2012. Vol. 364. Iss. 1. Article number 012131. DOI: 10.1088/1742-6596/364/1/012131.

13. *Kostyukov V.N.* Real-Time monitoring of machinery operation hazards / V.N.Kostyukov, A.V.Kostyukov // Neftyanoe Khozyaystvo – Oil Industry. 2014. Iss. 9. P.46-49.

14. *Kowalczyk A.* Groundwater recharge of carbonate aquifers of the Silesian-Cracow Triassic (southern Poland) under human impact / *A.Kowalczyk*, A.J.Witkowski // Environmental Geology. 2008. Vol. 55. Iss. 2. P.235-246. DOI: 10.1007/s00254-007-0999-9.

15. Substantiation of the rational method to control the operating and technical-condition parameters of a heading-and-winning machine for potash mines / D.I.Shishlyannikov, N.V.Chekmasov, M.G.Trifanov, S.L Ivanov, I.E.Zvonarev // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2015. Vol. 3. P.283-287. DOI: 10.3103/S105261881503019X.

16. *Shishlyannikov D.I.* Operational control and diagnostics of the equipment by the parameters of the electric drive power supply by the example of deep well pump units / D.I.Shishlyannikov, M.A.Vasilyeva // MEACS2016, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2017. Vol. 177. P.12-16. DOI: 10.1088/1757-899X/177/1/012013.

Авторы: **Д.И. Шишлянников**, *канд. техн. наук*, *доцент*, *4varjag@mail.ru* (*Пермский национальный исследовательский политехнический университет*, *Пермь*, *Россия*), **А.А.Рыбин**, *д-р техн. наук*, *профессор*, *aarybin@pstu.ru* (*Пермский национальный исследовательский политехнический университет*, *Пермь*, *Россия*).

Статья принята к публикации 23.05.2017.