

УДК 622.276.53

## УРАВНОВЕШЕННОСТЬ УСТАНОВОК СКВАЖИННЫХ ШТАНГОВЫХ НАСОСОВ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ВАТТМЕТРОГРАММ

Яшин Антон Николаевич<sup>1</sup>,  
yashin.anton.2012@mail.ru

Хакимьянов Марат Ильгизович<sup>1</sup>,  
hakimyanovmi@gmail.com

<sup>1</sup> Уфимский государственный нефтяной технический университет,  
Россия, 450064, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1.

**Актуальность.** Значительная часть фонда нефтедобывающих скважин нашей страны эксплуатируется установками скважинных штанговых насосов. В качестве приводов установок скважинных штанговых насосов используются низкоскоростные асинхронные электродвигатели с повышенным пусковым моментом. Электродвигатели таких установок работают в недогруженном по мощности режиме с циклически изменяющейся нагрузкой. Такие режимы отрицательно влияют как на работу самих электродвигателей, так и на электрическую сеть. Ухудшаются энергетические характеристики двигателей, такие как коэффициент полезного действия и коэффициент мощности. Балансировка установок скважинных штанговых насосов путем регулирования грузов противовесов позволяет сделать нагрузку более равномерной, улучшив режимы работы приводов и снизив расход электроэнергии. Однако оценить сбалансированность работающих установок достаточно сложно, так как скважины обычно не оборудованы датчиками для измерения ваттметрограмм и оценки сбалансированности. На месторождениях часто балансировку проводят при помощи обычных мультиметров с токовыми клещами. Поэтому важно оценить влияние сбалансированности насосных установок скважин действующего фонда на потери электроэнергии.

**Цель:** исследовать скважинные насосные установки действующего фонда с точки зрения сбалансированности; определить, какая часть фонда скважинных насосных установок является сбалансированной, какой коэффициент неуравновешенности имеют другие скважины; оценить влияние сбалансированности установок скважинных штанговых насосов на потребление электроэнергии; сделать выводы о перерасходе потребления электроэнергии в результате недостаточной сбалансированности.

**Объекты:** нефтедобывающие скважины, скважинные штанговые насосные установки, асинхронные электроприводы.

**Методы:** статистический анализ ваттметрограмм; математические методы анализа ваттметрограмм с определением среднего значения потребляемой мощности, коэффициента неуравновешенности, потенциала энергосбережения.

**Результаты.** Установлено, что сбалансированными можно считать только 2 % скважинных насосных установок. При этом 35 % скважинных насосных установок имеют коэффициент неуравновешенности хуже 0,5. Показано отрицательное влияние недостаточной балансировки установок скважинных штанговых насосов на потребление электроэнергии. В результате доуравновешивания энергопотребление приводов скважинных насосов может быть снижено более чем в 2 раза при сохранении объемов добычи.

### Ключевые слова:

Нефтедобывающая скважина, установка скважинного штангового насоса, асинхронный электропривод, ваттметрограмма, балансировка, энергопотребление.

### Введение

Энергоэффективность технологических процессов является важным фактором конкурентоспособности для всех промышленных предприятий [1, 2]. Организации проводят энергетический аудит своих технологических процессов, после которого разрабатывают меры по повышению эффективности своих производств.

Нефтедобывающие предприятия уделяют вопросам энергоэффективности особое внимание, так как цены на их продукцию – углеводородное сырье – в последнее десятилетие стабильно снижаются. В то же время затраты на добычу постоянно увеличиваются из-за роста цен на электроэнергию, удорожания оборудования, повышения уровня оплаты труда.

Снижению цен на углеводородное сырье способствует глобальное развитие возобновляемой энергетики, бурный рост количества электромобилей, ужесточение экологических стандартов [3, 4]. Двигатели внутреннего сгорания автомобилей, транспортных

средств и другие промышленные установки становятся более экономичными, что также способствует снижению мировых потребностей в нефти и нефтепродуктах.

Однако, по нашему мнению, наша страна в силу климатических особенностей не сможет полностью отказаться от углеводородного сырья, хотя доля энергии, вырабатываемой возобновляемыми источниками, будет увеличиваться. Поэтому нефтяникам важно будет минимизировать себестоимость добычи нефти, сократив, в первую очередь, расход электроэнергии [5].

Самыми энергоемкими потребителями на нефтепромыслах являются электроприводы нефтедобывающих скважинных насосов, которые хоть и имеют сравнительно небольшие мощности, но в большом количестве рассредоточены на обширных территориях. Также существенный вклад в энергопотребление вносят системы поддержания пластового давления, промысловой подготовки и трубопроводного транспорта нефти и газа.

Основными типами скважинных насосов для добычи нефти являются электроцентробежные погружные насосы, скважинные штанговые насосы и винтовые насосы. Остальные типы скважинных насосов (вибрационные, инжекторные, мембранные) используются значительно реже и не вносят существенного вклада в энергопотребление.

Скважинные штанговые насосы (СШН) являются основным способом механизированной эксплуатации скважин во многих странах (США, Канада) и многих нефтяных компаниях (ПАО «Татнефть»). В нашей стране установки СШН являются одним из основных типов скважинных насосов, уступая лишь установкам электроцентробежных погружных насосов по количеству эксплуатируемых скважин и объемам добываемой нефти.

Работа электроприводов установок СШН имеет ряд особенностей. Электроприводы СШН работают с переменной циклически изменяющейся нагрузкой при мощностях ниже номинальных, что отрицательно влияет на коэффициент мощности сети и коэффициент полезного действия самого двигателя. Из-за необходимости обеспечения высокого момента при пуске насосной установки, особенно в зимнее время, СШН комплектуются электродвигателями заведомо большей мощности и во время работы оказываются в значительной степени недогруженными.

Улучшить режим работы электропривода СШН позволяет его уравновешивание, которое проводится на основе ваттметрограмм – графиков активной мощности, потребляемой электродвигателем [6–10].

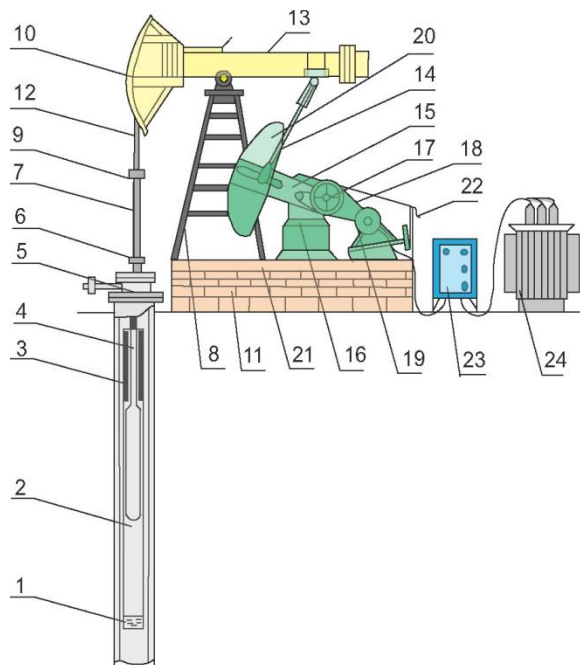
Поэтому проблема повышения сбалансированности (или уравновешивания) установок СШН является актуальной для нефтегазодобывающих предприятий.

#### Установка скважинного штангового насоса

Схема установки СШН показана на рис. 1. Установка СШН состоит из погружной и наземной частей. Погружная часть содержит фильтр, скважинный штанговый глубинный насос, колонну насосно-компрессорных труб и колонну насосных штанг. Наземная часть включает в себя следующее оборудование: устьевая арматура, устьевой сальник, полированный шток, стойка, траверсы канатной подвески, головка балансира, фундамент, канатная подвеска, балансир, шатун, кривошип, редуктор, шкив, клиноременная передача, электродвигатель, балансировочные грузы, рама, тормоз, станция управления и трансформатор.

Кривошипно-шатунный механизм установки СШН преобразует вращение вала электродвигателя, передаваемое через редуктор, в возвратно-поступательное движение полированного штока и соединенной с ним колонны насосных штанг [11, 12]. Если принять скорость вращения вала электродвигателя постоянной, то движение точки подвеса штанг происходит по закону, близкому к гармоническому. Но так как для привода используются асинхронные электродвигатели, а нагрузка циклически изменяется, перемещение точки подвеса штанг будет отличаться от гармонического закона. Для привода установок СШН в боль-

шинстве случаев используются асинхронные электродвигатели с повышенным пусковым моментом напряжением 0,4 кВ с синхронной скоростью вращения 500; 750; 1000 либо 1500 об/мин мощностью 22–37 кВт. Широко используются электродвигатели серий 4А, 5А, АИР и другие.



**Рис. 1.** Оборудование установки штангового глубинного насоса: 1 – фильтр, 2 – скважинный насос, 3 – насосно-компрессорные трубы, 4 – насосные штанги, 5 – оборудование устья, 6 – устьевой сальник, 7 – полированный шток, 8 – стойка, 9 – траверсы канатной подвески, 10 – головка балансира, 11 – фундамент, 12 – канатная подвеска, 13 – балансир, 14 – шатун, 15 – кривошип, 16 – редуктор, 17 – шкив, 18 – клиноременная передача, 19 – электродвигатель, 20 – балансировочный груз, 21 – рама, 22 – тормоз, 23 – станция управления, 24 – трансформатор

**Fig. 1.** Sucker rod pumping unit equipment: 1 – filter, 2 – well pump, 3 – tubing, 4 – sucker rods, 5 – wellhead equipment, 6 – wellhead stuffing box, 7 – polished rod, 8 – stand, 9 – traverse rope suspension, 10 – balancer head, 11 – foundation, 12 – rope suspension, 13 – balancer, 14 – connecting rod, 15 – crank, 16 – gearbox, 17 – pulley, 18 – V-belt transmission, 19 – electric motor, 20 – balancing weight, 21 – frame, 22 – brake, 23 – control station, 24 – transformer

Также для приводов установок СШН разрабатываются специальные типы электродвигателей, например, вентильные. Вентильные двигатели могут работать на низких скоростях вращения (до 200 об/мин и ниже), что позволяет их устанавливать прямо на входном валу редуктора. При этом из схемы насосной установки исключается ременная передача и, соответственно, исчезают проблемы с обрывом ремней. Однако в силу высокой стоимости вентильные приводы пока не получили распространения на установках СШН.

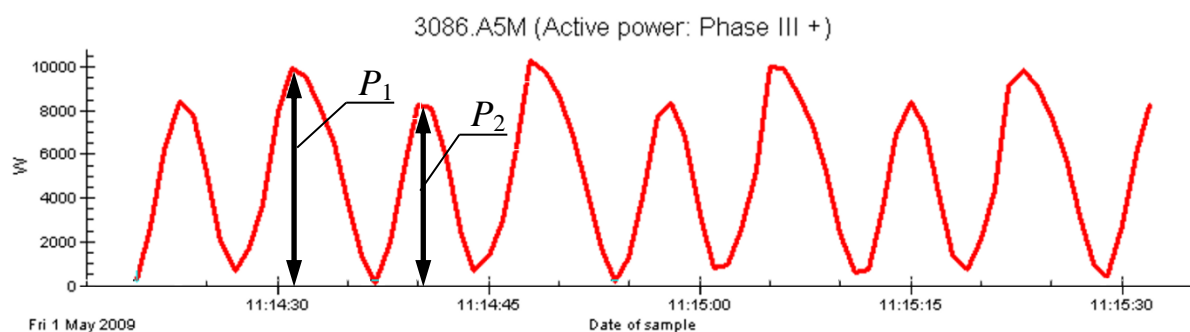
### Уравновешивание установок скважинных штанговых насосов

При отсутствии уравновешивания электропривод установки СШН будет работать в двигательном режиме при подъеме колонны штанг вместе со скважинной жидкостью и будет переходить в генераторный режим во время спуска. С целью сделать нагрузку более равномерным в конструкцию насосных установок добавлены балансировочные грузы.

Следует отметить, что кинематика установок СШН такова, что во время опускания колонны штанг происходит подъем балансировочных грузов с накоплением в них потенциальной энергии. Затем во время подъема колонны штанг происходит опускание балансировочных грузов. Таким образом, балансировочные грузы догружают электродвигатель во время опускания колонны штанг и разгружают его во время подъема колонны штанг и скважинной жидкости [13]. Процесс перемещения грузов называется уравновешиванием, или балансировкой, установки СШН. Однако полностью сгладить нагрузку уравновешивание неспособно, оно позволяет лишь исключить переход электродвигателя в генераторный режим и обеспечить равенство максимальных значений потребляемой мощности на отрезках времени, соответствующих подъему и спуску штанговой колонны.

График потребляемой электродвигателем установкой СШН активной мощности за один или несколько циклов качания называется ваттметрограммой. Ваттметрограммы являются эффективным и распространенным способом мониторинга скважинных насосных установок. Ваттметрограммы позволяют диагностировать целый ряд неисправностей наземного и погружного оборудования, таких как дефекты редуктора, подшипников станка-качалки, обрывы ремней, штанг и недостаточную уравновешенность насосной установки [14–16]. Из массива ваттметрограммы путем математической обработки может быть получен массив динамограммы, а анализ динамограммы позволяет диагностировать целый ряд неисправностей погружного оборудования: утечки во всасывающем и нагнетательном клапанах, запарафинивание насоса, неполное заполнение цилиндра насоса жидкостью, влияние пластового газа, срыв подачи, искривление цилиндра насоса, слишком низкая или слишком высокая посадка плунжера, выход плунжера из насоса и другие.

При уравновешивании стараются обеспечить равенство максимальных значений активной мощности, потребляемой электродвигателем, при подъеме ( $P_1$ ) и спуске ( $P_2$ ) колонны штанг (рис. 2).



**Рис. 2.** Ваттметрограмма установки скважинного штангового насоса:  $P_1$  – максимальная потребляемая активная мощность при подъеме колонны штанг;  $P_2$  – максимальная потребляемая активная мощность при спуске колонны штанг

**Fig. 2.** Wattmeter card of the sucker rod pump unit:  $P_1$  – maximum consumed active power when lifting the rod string;  $P_2$  – maximum consumed active power when lowering the rod string

Уровень сбалансированности установки СШН оценивают при помощи коэффициента неуравновешенности, который определяется следующим образом [17]:

$$k = \frac{P_1 - P_2}{P_1 + P_2}.$$

На практике часто уравновешивание установок СШН проводят по значениям тока [18]:

$$k_i = \frac{I_1 - I_2}{I_1 + I_2},$$

где  $I_1$  – максимальный ток при подъеме колонны штанг, А;  $I_2$  – максимальный ток при спуске колонны штанг, А.

Уравновешивание по току проводят по той причине, что у операторов на промысле часто отсутству-

ют приборы для измерения ваттметрограмм, а есть только мультиметры с токовыми клещами. Однако ток в течение цикла качания установки СШН изменяется значительно меньше, чем активная мощность (рис. 3), поэтому произвести качественную балансировку по току очень сложно [19]. Из представленных на рис. 3 синхронизированных токограммы и ваттметрограммы видно, что ток изменяется за цикл качания от 22,8 до 25,6 А (на 11 %), в то время как активная мощность изменяется с 1040 до 8009 Вт (на 87 %). Таким образом, балансировка установки СШН по значениям активной мощности будет значительно точнее, чем балансировка по значениям тока [20].

Наиболее правильно было бы производить уравновешивание не по максимальным значениям токов или мощности, а по энергии, затрачиваемой при подъеме и спуске колонны штанг, то есть по интегралам активной мощности за время подъема и спуска:

$$k_w = \frac{\int_{T_1} p dt - \int_{T_2} p dt}{\int_{T_1} p dt + \int_{T_2} p dt},$$

где  $p$  – мгновенное значение активной мощности, Вт;  $T_1$  – время подъема колонны штанг, с;  $T_2$  – время спуска колонны штанг, с.

Однако уравновешивание по энергии практически не используется, так как требует наличия специальных приборов, подключенных к измерительным трансформаторам тока, напряжения и датчику положения, определяющему начало хода вверх и вниз. Такие приборы могут быть интегрированы в состав ин-

теллектуальных станций управления, но их количество пока очень мало [21–24].

Также можно делать оценку сбалансированности сравнивая длительности хода колонны штанг вверх и вниз (и скорости движения вверх и вниз). Так как скорость вращения асинхронных двигателей уменьшается с ростом момента на рабочем участке характеристики, то и время движения будет различным. Однако для реализации таких способов необходима точная фиксация моментов прохождения штоком нижней и верхней мертвых точек. На практике станции управления часто не имеют датчиков положения либо имеют один датчик, фиксирующий прохождение только нижней мертвой точки.

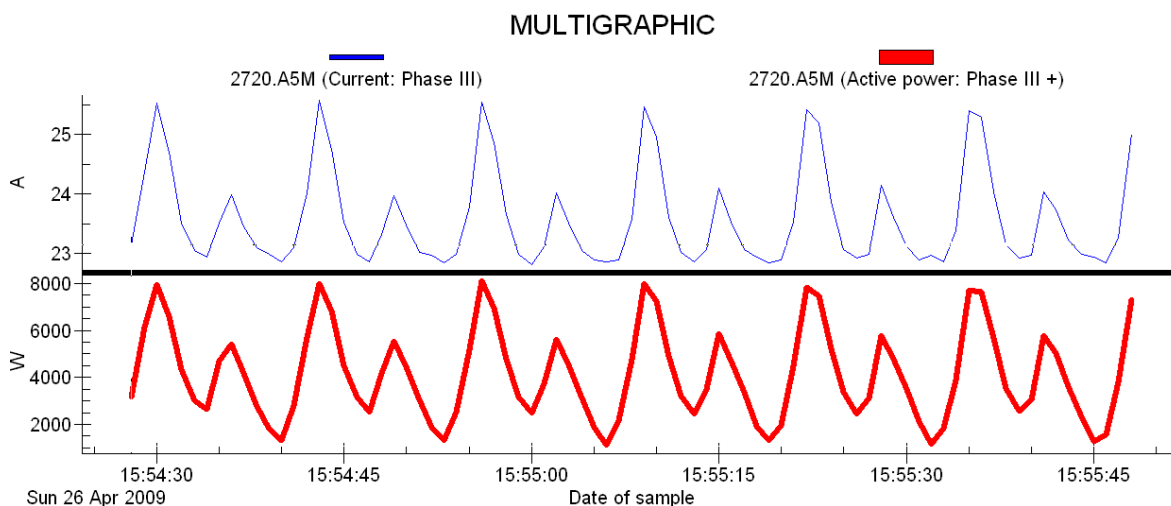


Рис. 3. Синхронизированные по времени токограмма и ваттметрограмма  
 Fig. 3. Time-synchronized current card and wattmeter card

Установлено, что недостаточная уравновешенность установок СШН приводит к дополнительным потерям мощности [25]. На рис. 4 приводится диа-

грамма, устанавливающая связь между коэффициентом неуравновешенности  $k$  и непроизводительным перерасходом мощности.

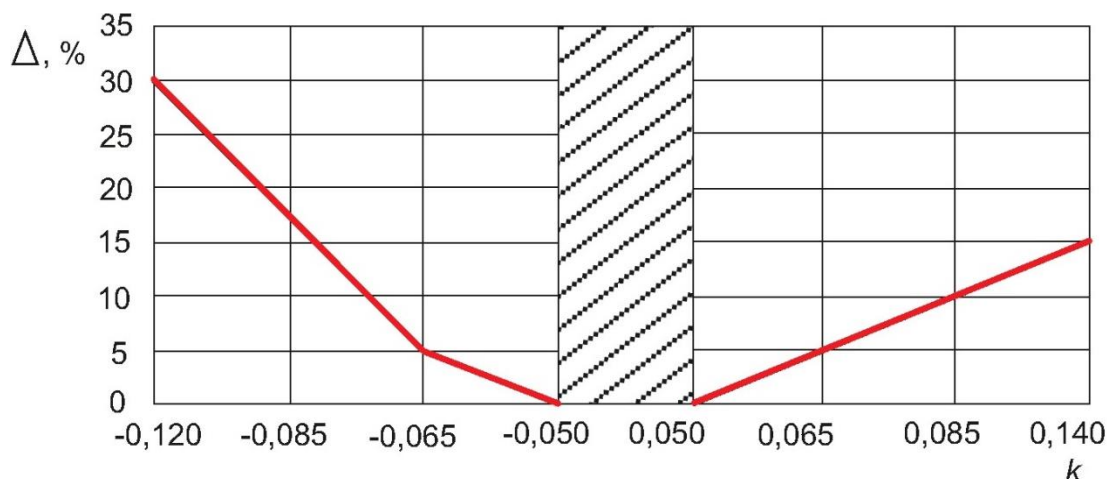


Рис. 4. Зависимость перерасхода мощности от коэффициента неуравновешенности установки скважинного штангового насоса [25]  
 Fig. 4. Dependence of power losses on the unbalance factor of the sucker rod pump unit [25]

Как видно из рис. 4, неуравновешенность значительно увеличивает потребление мощности насосной установки. Так, при коэффициенте неуравновешенности  $k=0,14$  перерасход мощности составит до 15 %, а

при  $k=-0,12$  перерасход мощности увеличится до 30 %. Если на СШН установлены слишком большие грузы (двигатель потребляет при подъеме штанговой колонны мощность меньше, чем при спуске), то ко-

эффицент неуравновешенности принимает отрицательные значения. При этом потери мощности почти в два раза превышают потери при положительном значении коэффициента неуравновешенности.

Если коэффициент неуравновешенности находится в пределах от минус 0,05 до +0,05, то насосная установка считается уравновешенной. И дополнительные потери мощности в этом случае можно не учитывать [26–28].

#### Анализ практических ваттметрограмм

Авторами был проведен анализ ваттметрограмм более чем 50 скважин месторождений Западной Сибири, эксплуатируемых СШН. При этом ставилась задача оценить общий уровень сбалансированности насосных установок, а также возможный эффект энергосбережения, который может быть получен в результате их уравновешивания.

Для каждой ваттметрограммы определялись максимальные значения активной мощности при подъеме и спуске колонны штанг, на основе которых вычислялись коэффициенты неуравновешенности. Затем были найдены доли скважин, соответствующих определенным диапазонам коэффициента неуравновешенности.

Результаты проведенного исследования сбалансированности скважин, эксплуатируемых СШН, приведены в табл. 1.

На рис. 5 приведена диаграмма уравновешенности фонда скважин. Как видно из диаграммы, сбалансированными можно считать лишь 2 % скважин, имеющих коэффициент неуравновешенности от минус 0,05 до +0,05.

33 % скважин работает с коэффициентом неуравновешенности от минус 1,0 до минус 0,5; 27 % – от минус 0,5 до минус 0,2; 13 % – от минус 0,2 до минус 0,1; 2 % – от минус 0,1 до минус 0,05. 4 % скважин работает с коэффициентом неуравновешенности от 0,05 до 0,1; 13 % – от 0,1 до 0,2; 4 % – от 0,2 до 0,5 и 2 % – от 0,5 до 1,0.

Таблица 1. Результаты исследования сбалансированности скважин

Table 1. Results of the study of well balance

Диапазон коэффициента неуравновешенности Range of imbalance coefficient	Доля скважин, % Part of wells, %
-1,0...-0,5	33
-0,5...0,2	27
-0,2...0,1	13
-0,1...0,05	2
-0,05...0,05	2
0,05...0,1	4
0,1...0,2	13
0,2...0,5	4
0,5...1,0	2

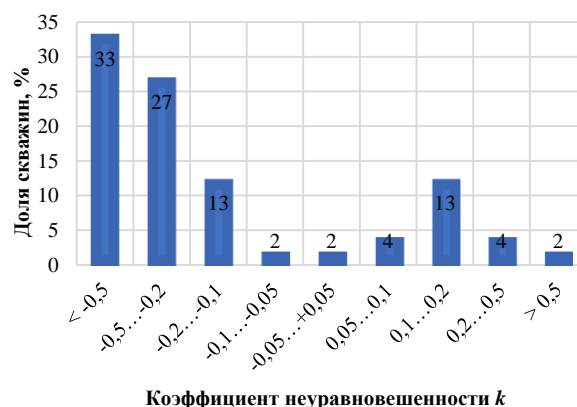


Рис. 5. Диаграмма уравновешенности фонда скважин

Fig. 5. Diagram of well balance

При этом было зафиксировано минимальное отрицательное значение коэффициента неуравновешенности  $k=-0,85$ , а максимальное положительное значение  $k=0,74$ . Ваттметрограммы скважин с коэффициентами неуравновешенности  $k=-0,85$  и  $k=0,74$  приведены на рис. 6, 7 соответственно.

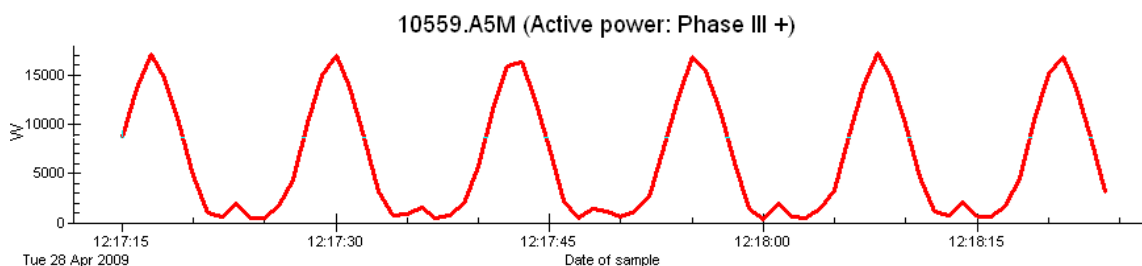


Рис. 6. Ваттметрограмма с коэффициентом неуравновешенности  $k=-0,85$

Fig. 6. Wattmeter card with the imbalance coefficient  $k=-0,85$

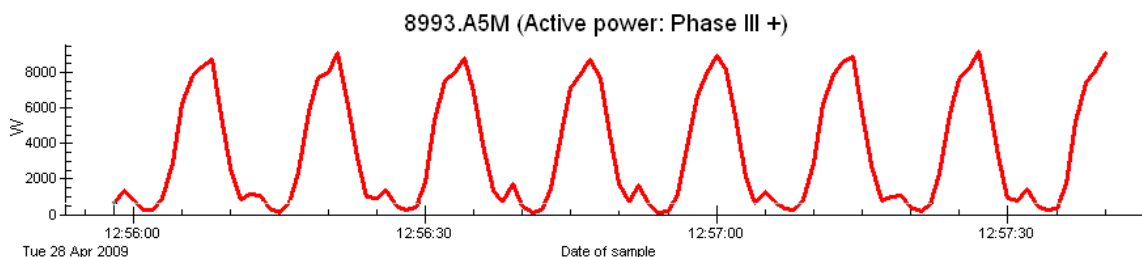


Рис. 7. Ваттметрограмма с коэффициентом неуравновешенности  $k=0,74$

Fig. 7. Wattmeter card with the imbalance coefficient  $k=0,74$

Как видно из рис. 6, 7, при таких больших значениях коэффициента неуравновешенности на ваттметрограммах исчезает один из пиков потребления мощности за каждый цикл качания. Это приводит к тому, что двигатель половину цикла качания работает недогруженным в режиме, близком к холостому ходу. При еще большей разбалансированности двигатель может переходить в генераторный режим. А другую половину периода наблюдается повышенное потребление электроэнергии.

75 % скважин имеют отрицательный коэффициент неуравновешенности, то есть мощность, потребляемая электродвигателем на подъем колонны штанг и скважинной жидкости, меньше, чем мощность, потребляемая на подъем уравновешивающих грузов. При этом потери выше, чем при таком же по модулю, но положительном значении коэффициента неуравновешенности.

Работа электродвигателя в режиме с резкопеременной циклически изменяющейся нагрузкой вызывает ухудшение энергетических показателей, таких как КПД и коэффициент мощности  $\cos \phi$ . Это отрицательно влияет на электрическую сеть.

#### Определение потенциала снижения потребляемой мощности в результате уравновешивания установок скважинных штанговых насосов

Были проведены расчеты потенциала снижения потребляемой мощности в результате выполнения мероприятий по уравновешиванию установок СШН.

Для этого определяется активная энергия за период качания установки СШН:

$$W = \int_0^T p dt,$$

где  $p$  – мгновенное значение активной мощности, Вт;  $T$  – период качания установки СШН, с.

Затем находится эффективное значение активной мощности за период качания:

$$P_{ef} = \frac{W}{T} = \frac{\int_0^T p dt}{T}.$$

Далее при помощи зависимости, приведенной на рис. 4, определяется перерасход мощности  $\Delta$  при данном значении коэффициента неуравновешенности  $k$ .

Находится эффективное значение активной мощности, которое будет потребляться электроприводом установки СШН после уравновешивания:

$$P'_{ef} = \frac{P_{ef} \cdot 100 \%}{100 + \Delta},$$

где  $P'_{ef}$  – эффективное значение активной мощности после уравновешивания, Вт;  $\Delta$  – перерасход мощности из-за недостаточной балансировки установки, %.

Результаты расчетов потенциала снижения потребляемой мощности в результате уравновешивания установок СШН приведены в табл. 2.

Как видно из табл. 2, если произвести балансировку проанализированных скважин, то потребляемая их электроприводами мощность снизится на 5...20 %.

Таким образом, балансировка установок СШН способна существенно снизить потребление электроэнергии скважинных насосных установок при сохранении объемов добычи на прежнем уровне.

**Таблица 2.** Результаты расчетов потенциала снижения потребляемой мощности в результате уравновешивания установок скважинных штанговых насосов

**Table 2.** Results of calculating the potential for reducing power consumption as a result of the sucker rod pump units balancing

Номер скважины Number of well	$P_{ef}$ , кВт/ kW	Коэффициент неуравновешенности $k$ Imbalance coefficient $k$	$P'_{ef}$ , кВт/ kW	Снижение потребляемой мощности, % Reduced power consumption, %
1	5,54	0,065	5,29	4,76
2	7,27	-0,12	5,59	23,08
3	6,01	-0,06	5,78	3,85
4	6,81	-0,085	5,77	15,25
5	2,93	0,14	2,55	13,04
6	9,62	0,05	9,62	0,00
7	8,92	0,085	8,11	9,09
8	7,62	-0,075	6,87	9,91
9	6,41	-0,11	5,05	21,26
10	18,44	-0,06	17,74	3,85

#### Выводы

На основании проведенного исследования могут быть сделаны следующие выводы:

1. Ваттметрирование является эффективным методом контроля состояния наземного оборудования и степени сбалансированности установок скважинных штанговых насосов.
2. Сбалансированность, или уравновешенность, установок скважинных штанговых насосов может оцениваться по значениям тока, активной мощности, потребляемой за полупериоды электроэнергии, либо по скорости или времени движения точки подвеса штанг.
3. Анализ ваттметрограмм скважин действующего фонда месторождений Западной Сибири показал, что только 2 % установок скважинных штанговых насосов могут считаться сбалансированными (имеющими коэффициент неуравновешенности от минус 0,05 до +0,05). При этом 35 % скважинных насосных установок имеют коэффициент неуравновешенности менее минус 0,5 или более +0,5.
4. Недостаточная сбалансированность установок скважинных штанговых насосов вызывает перерасход электроэнергии и приводит к работе электродвигателя в недогруженном режиме с низкими значениями коэффициента мощности и коэффициента полезного действия.
5. Если произвести балансировку установок скважинных штанговых насосов всех рассмотренных скважин, то потребление ими электроэнергии снизится на 5...20 %. Это позволяет считать балансировку установок скважинных штанговых насосов одним из наиболее эффективных энергосберегающих мероприятий для нефтедобывающих предприятий.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ефремов В.В., Маркман Г.З. «Энергосбережение» и «энергоэффективность»: уточнение понятий, система сбалансированных показателей энергоэффективности // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2007. – Т. 311. – № 4. – С. 146–148.
2. Energy efficiency in the industrial sector in the EU, Slovenia, and Spain / J. Malinauskaitė, H. Jouhara, B. Egilegor, F. Al-Mansour, L. Ahmad, M. Pusnik // Energy. – 2020. – V. 208. – 118398 p.
3. Nyangarika A.M., Tang B. Influence oil price towards economic indicators in Russia // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2018. – V. 192. – № 1. – 012066 p.
4. Ardito L., Petruzzelli A.M., Ghisetti C. The impact of public research on the technological development of industry in the green energy field // Technological Forecasting and Social Change. – 2019. – V. 144. – P. 25–35.
5. Букреев В.Г., Сипайлова Н.Ю., Сипайлов В.А. Стратегия управления электротехническим комплексом механизированной добычи нефти на основе экономического критерия // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2017. – Т. 328. – № 3. – С. 75–84.
6. Зюзев А.М., Бубнов М.В. Диагностика уравновешенности штанговой глубинной насосной установки по ваттметрограмме // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 330. – № 4. – С. 178–187.
7. Khakimyanov M.I. et al. Monitoring of sucker-rod pump units as a result of the analysis wattmeter cards // Journal of Physics: Conference Series. – 2017. – V. 803. – № 1. – 012066 p.
8. Zyuzev A.M., Bubnov M.V. Model for sucker-rod pumping unit operating modes analysis based on SimMechanics library // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – V. 944. – № 1. – 012130 p.
9. Method of efficient control of the sucker-rod pump electric drive / A.N. Ladygin, D.D. Bogachenko, V.V. Kholin, N.A. Ladygin // 27th International Workshop on Electric Drives: MPEI Department of Electric Drives 90th Anniversary (IWED). – Moscow, 2020. – P. 1–4.
10. A method for diagnosing formation fluid leakage during the operation of sucker rod pumps and a device for its implementation / R.A. Heydar, A.R. Sharif, H.V. Mamed, G.Z. Gazanfar // American Journal of Energy Engineering. – 2020. – V. 8. – № 4. – P. 40–44.
11. Гизатуллин Ф.А., Хакимьянов М.И. Анализ режимов работы электроприводов штанговых скважинных насосных установок // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2017. – Т. 13. – № 1. – С. 11–18.
12. Computational fluid dynamics model to improve sucker rod pump operating mode / S.V. Jalikop, B. Scheichl, S.J. Eder, S. Hönig // SPE Annual Technical Conference and Exhibition. – Denver, 2020. – P. 1–14.
13. Выбор критерия уравновешенности штанговых скважинных насосных установок / Г.И. Бикбулатова, Г.И. Болтнева, А.С. Галеев, Р.Н. Сулейманов, С.Л. Сабанов // Газовая промышленность. – 2019. – № 11 (792). – С. 124–128.
14. Zyuzev A.M., Bubnov M.V. SRPU balance monitoring by wattmeter card // 17th International Ural Conference on AC Electric Drives (ACED). – Ekaterinburg, 2018. – P. 1–5.
15. Миловзоров Г.В., Ширококов П.Э., Хакимьянов М.И. Технологические процессы исследования штанговых глубинных насосов на основе динамометрирования и ваттметрирования // Информационные технологии в науке, промышленности и образовании. – Ижевск: Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова, 2017. – С. 160–165.
16. Zheng B., Gao X., Pan R. Sucker rod pump working state diagnosis using motor data and hidden conditional random fields // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2019. – V. 67. – № 9. – P. 7919–7928.
17. Хакимьянов М.И. Повышение эффективности эксплуатации электроприводов нефтедобывающих штанговых глубинных насосов // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2018. – № 1–2. – С. 82–89.
18. Solodkiy E.M., Kazantsev V.P., Dadenkov D.A. Improving the energy efficiency of the sucker-rod pump via its optimal counterbalancing // 2019 International Russian Automation Conference (RusAutoCon). – Sochi, 2019. – P. 1–5.
19. Zhang R. et al. A real-time diagnosis method of reservoir-wellbore-surface conditions in sucker-rod pump wells based on multidata combination analysis // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2021. – V. 198. – 108254 p.
20. Садов В.Б. Определение дефектов оборудования нефтяной скважины по динамограмме // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. – 2013. – Т. 13. – № 1. – С. 61–71.
21. Интеллектуализированная станция управления станком-качалкой / Г.А. Гулуев, А.Г. Рзаев, Я.Г. Алиев, М.Г. Ризванов, И.Р. Саттаров // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2011. – № 8. – С. 17–21.
22. Контроль технического состояния ШСНУ в процессе периодической эксплуатации / А.С. Галеев, Р.И. Арсланов, П.П. Ермилов, И.А. Кузьмин // Сетевое издание «Нефтегазовое дело». – 2012. – № 1. – С. 24–29.
23. Modular structure of the intelligent oil production equipment control station / С. Tagirova, A. Gladkih, D. Bakiev, A. Vulfin // 2nd International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA). – Lipetsk, 2020. – P. 539–544.
24. A working condition diagnosis model of sucker rod pumping wells based on deep learning / X. Wang, Y. He, F. Li, Z. Wang, X. Dou, H. Xu, L. Fu // SPE Production & Operations. – 2021. – V. 36. – № 02. – P. 317–326.
25. Исаченко И.Н., Гольдштейн Е.И., Налимов Г.П. Методы контроля сбалансированности станка-качалки на основе измерения электрических параметров // Нефтяное хозяйство. – 2002. – № 1. – С. 60–61.
26. Деев В.Г., Смородов Е.А., Исмаков Р.А. Методы экспресс-оценки качества фонда нефтедобывающих скважин // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 2001. – № 1. – С. 40–45.
27. Байков И.Р., Смородов Е.Л., Соловьев В.Я. Динамические нагрузки в штангах глубинных насосов и их влияние на безопасность эксплуатации // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 2003. – № 1. – С. 41–45.
28. A real-time diagnosis method of reservoir-wellbore-surface conditions in sucker-rod pump wells based on multidata combination analysis / R. Zhang, Y. Yin, L. Xiao, D. Chen // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2021. – V. 198. – 108254 p.

Поступила 16.06.2021 г.

## Информация об авторах

**Яшин А.Н.**, ассистент кафедры электротехники и электрооборудования предприятий Уфимского государственного нефтяного технического университета.

**Хакимьянов М.И.**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой электротехники и электрооборудования предприятий Уфимского государственного нефтяного технического университета.

UDC 622.276.53

**BALANCE OF SUCKER ROD PUMP UNITS BASED ON ANALYSIS OF WATTMETROGRAMS**

Anton N. Yashin<sup>1</sup>,  
yashin.anton.2012@mail.ru

Marat I. Khakimyanov<sup>1</sup>,  
hakimyanovmi@gmail.com

<sup>1</sup> Ufa State Petroleum Technological University,  
1, Kosmonavtov street, Ufa, 450064, Russia.

**The relevance.** A significant part of the oil production wells in our country is operated by sucker rod pumping units. Low-speed asynchronous electric motors with increased starting torque are used as drives for sucker rod pumping units. Electric motors of such units operate in underloaded modes with cyclically varying load. Such modes negatively affect both the operation of the electric motors themselves and the electrical network. The energy characteristics of the motors, such as efficiency and power factor, are impaired. The balancing of the sucker rod pump units by adjusting the counterweight weights allows the load to be made more uniform, improving the drive modes and reducing power consumption. However, it is rather difficult to assess the balance of operating units, since wells are usually not equipped with sensors for measuring wattmeter cards and assessing balance. In the fields, balancing is often carried out using conventional multimeters with current clamps. Therefore, it is important to assess the balance of the wells of the operating stock and the resulting excessive consumption of electricity.

**The main aim** of the research is to explore the downhole pumping systems existing fund in terms of balance; determine what part of the fund of downhole pumping units is balanced, what unbalance coefficient other wells have; evaluate the influence of the balance of sucker rod pump units on electricity consumption; draw conclusions about the excessive consumption of electricity as a result of insufficient balance.

**Objects:** oil producing wells, borehole sucker rod pumping units, asynchronous electric drives.

**Methods:** statistical analysis of wattmeter cards; mathematical methods for analyzing wattmeter cards with determining the average value of power consumption, the coefficient of imbalance, and the potential for energy saving.

**Results.** It was found that only 2 % of borehole pumping units can be considered balanced. At the same time, 35 % of borehole pumping units have an unbalance coefficient worse than 0,5. The negative effect of insufficient balancing of sucker rod pumps on power consumption is shown. As a result of rebalancing, the energy consumption of borehole pump drives can be reduced by more than 2 times while maintaining production volumes.

**Key words:**

Oil production well, sucker rod pump unit, asynchronous electric drive, wattmeter card, balancing, energy consumption.

**REFERENCES**

- Efremov V.V., Markman G.Z. «Energy saving» and «Energy efficiency»: clarification of concepts, system of balanced energy efficiency indicators. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2007, vol. 311, no. 4, pp. 146–148. In Rus.
- Malinauskaite J., Jouhara H., Egilegor B., Al-Mansour F., Ahmad L., Pusnik M. Energy efficiency in the industrial sector in the EU, Slovenia, and Spain. *Energy*, 2020, vol. 208, 118398 p.
- Nyngarika A.M., Tang B. Influence oil price towards economic indicators in Russia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2018, vol. 192, no. 1, 012066 p.
- Ardito L., Petruzzelli A.M., Ghisetti C. The impact of public research on the technological development of industry in the green energy field. *Technological Forecasting and Social Change*, 2019, vol. 144, pp. 25–35.
- Bukreev V.G., Sipaylova N.Yu., Sipaylov V.A. Management strategy of the electrotechnical complex of mechanized oil production based on the economic criterion. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2017, vol. 328, no. 3, pp. 75–84. In Rus.
- Zyuzev A.M., Bubnov M.V. Diagnostics of the balance of the rod deep pumping unit according to the wattmetrogram. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330, no. 4, pp. 178–187. In Rus.
- Khakimyanov M.I. Monitoring of sucker-rod pump units as a result of the analysis wattmeter cards. *Journal of Physics: Conference Series*, 2017, vol. 803, no. 1, 012066 p.
- Zyuzev A.M., Bubnov M.V. Model for sucker-rod pumping unit operating modes analysis based on SimMechanics library. *Journal of Physics: Conference Series*, 2018, vol. 944, no. 1, 012130 p.
- Ladygin A.N., Bogachenko D.D., Kholin V.V., Ladygin N.A. Method of efficient control of the sucker-rod pump electric drive. *27<sup>th</sup> International Workshop on Electric Drives: MPEI Department of Electric Drives 90th Anniversary (IWED)*. Moscow, 2020. pp. 1–4.
- Heydar R.A., Sharif A.R., Mamed H.V., Gazanfar G.Z. A method for diagnosing formation fluid leakage during the operation of sucker rod pumps and a device for its implementation. *American Journal of Energy Engineering*, 2020, vol. 8, no. 4, pp. 40–44.
- Gizatullin F.A., Khakimyanov M.I. Analysis of operating modes of electric drives of rod borehole pumping units. *Electrotechnical and information complexes and systems*, 2017, vol. 13, no. 1, pp. 11–18. In Rus.
- Jalikip S.V., Scheichl B., Eder S.J., Hönl S. Computational fluid dynamics model to improve sucker rod pump operating mode. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, Society of Petroleum Engineers, Denver, 2020. pp. 1–14.
- Bikbulatova G.I., Boltneva G.I., Galeev A.S., Suleymanov R.N., Sabanov S.L. Selection of the balance criterion for rod borehole pumping units. *Gas industry*, 2019, no. 11 (792), pp. 124–128. In Rus.
- Zyuzev A.M., Bubnov M.V. SRPU balance monitoring by wattmeter card. *2018 17th International Ural Conference on AC Electric Drives (ACED)*. Ekaterinburg, 2018. pp. 1–5.
- Milovzorov G.V., Shirobokov P.E., Khakimyanov M.I. Tekhnologicheskie protsessy issledovaniya shtangovykh glubinnnykh nasosov na osnove dinamometrirovaniya i vattmetrirovaniya [Technological processes of research of rod depth pumps based on dynamometry and wattmetry]. *Informatsionnye tekhnologii v nauke, promyshlennosti i obrazovanii* [Information Technologies in Science, Industry and Education]. Izhevsk, Kalashnikov Izhevsk State Technical University Publ., 2017. pp. 160–165.
- Zheng B., Gao X., Pan R. Sucker rod pump working state diagnosis using motor data and hidden conditional random fields. *IEEE*



- Transactions on Industrial Electronics*, 2019, vol. 67, no. 9, pp. 7919–7928.
17. Khakimyanov M.I. Improving the efficiency of operation of electric drives of oil-producing rod depth pumps. *Electrical equipment: operation and repair*, 2018, no. 1–2, pp. 82–89. In Rus.
  18. Solodkiy E.M., Kazantsev V.P., Dadenkov D.A. Improving the energy efficiency of the sucker-rod pump via its optimal counterbalancing. *2019 International Russian Automation Conference (RusAutoCon)*. Sochi, 2019. pp. 1–5.
  19. Zhang R. A real-time diagnosis method of reservoir-wellbore-surface conditions in sucker-rod pump wells based on multidata combination analysis. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2021, vol. 198, 108254 p.
  20. Sadov V.B. Determination of defects in oil well equipment by dynamogram. *Bulletin of the South Ural State University. Series: Computer technologies, control, radio electronics*, 2013, vol. 13, no. 1, pp. 61–71. In Rus.
  21. Gulyaev G.A., Rzaev A.G., Aliev Ya.G., Rizvanov M.G., Satarov Yu.R. Intellectualized control station of the rocking machine. *Mechatronics, automation, control*, 2011, no. 8, pp. 17–21. In Rus.
  22. Galeev A.S., Arslanov R.I., Ermilov P.P., Kuzmin I.A. Control of the technical condition of the SHSNU in the process of periodic operation. *Online publication «Oil and Gas business»*, 2012, no. 1, pp. 24–29. In Rus.
  23. Tagirova C., Gladkih A., Bakiev D., Vulfin A. Modular Structure of the Intelligent Oil Production Equipment Control Station. *2<sup>nd</sup> International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA)*. Lipetsk, 2020. pp. 539–544.
  24. Wang X., He Y., Li F., Wang Z., Dou X., Xu H., Fu L. A working condition diagnosis model of sucker rod pumping wells based on deep learning. *SPE Production & Operations*, 2021, vol. 36, no. 02, pp. 317–326.
  25. Isachenko I.N., Goldstein E.I., Nalimov G.P. Methods for controlling the balance of the rocking machine on the basis of measuring electrical parameters. *Oil industry*, 2002, no. 1. pp. 60–61. In Rus.
  26. Deev V.G., Smorodov E.A., Ismakov R.A.. Methods of express assessment of the quality of the fund of oil-producing wells. *News of higher educational institutions. Oil and gas*, 2001, no. 1, pp. 40–45. In Rus.
  27. Baykov I.R., Smorodov E.L., Solovyov V.Ya.. Dynamic loads in the rods of deep pumps and their impact on the safety of operation. *News of higher educational institutions. Oil and gas*, 2003, no. 1, pp. 41–45. In Rus.
  28. Zhang R., Yin Y., Xiao L., Chen D. A real-time diagnosis method of reservoir-wellbore-surface conditions in sucker-rod pump wells based on multidata combination analysis. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2021, vol. 198, 108254 p.

Received: 16 June 2021.

#### Information about the authors

**Anton N. Yashin**, assistant, Ufa State Petroleum Technological University.

**Marat I. Khakimyanov**, Dr. Sc., professor, Ufa State Petroleum Technological University.