

УДК 622.276.53

ДИАГНОСТИКА УРАВНОВЕШЕННОСТИ ШТАНГОВОЙ ГЛУБИННОЙ НАСОСНОЙ УСТАНОВКИ ПО ВАТТМЕТРОГРАММЕ

Зюзов Анатолий Михайлович¹,

a.m.zyuzev@urfu.ru

Бубнов Матвей Владимирович¹,

m.v.bubnov@urfu.ru

¹ Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19.

Актуальность исследования обусловлена широким распространением штанговых глубинных насосных установок с нерегулируемым приводом, которые в основной своей массе оснащены исключительно средствами механической настройки. Эксплуатация установок данного типа сопровождается значительными потерями как потребляемой электроэнергии, так и добытой нефти, связанными с работой установки в неоптимальном режиме. Для решения данной проблемы как новые, так и уже эксплуатируемые штанговые глубинные насосные установки оборудуют станциями управления, в состав которых входят преобразователь частоты и программируемый логический контроллер, оснащенный средствами интеллектуального управления и диагностики. Реализация данных функций на контроллере станции управления штанговых глубинных насосных установок требует разработки соответствующих алгоритмов, обеспечивающих автономное, высокоэффективное, экономичное и надежное функционирование установки в течение всего срока эксплуатации.

Цель: разработка алгоритмов определения уравниваемости станка-качалки, оптимального положения противовеса и моментов прохождения штоком «мертвых точек».

Объекты: штанговая глубинная насосная установка в различных режимах работы, уравниваемость станка-качалки, определяемая положением противовесов на кривошипе.

Методы: математический аппарат дифференциальных уравнений и передаточных функций, компьютерное моделирование, сопоставление и анализ графиков и диаграмм.

Результаты. Рассмотрены способы определения уравниваемости, существующие в настоящий момент, и выявлены их недостатки. Наиболее доступным и надёжным средством диагностирования штанговых глубинных насосных установок, не требующим дополнительных навесных датчиков, является ваттметрирование. Для исследования закономерностей и режимов работы разработана компьютерная модель штанговых глубинных насосных установок. На основе данных, полученных в ходе моделирования, разработаны алгоритмы определения уравниваемости станка-качалки, оптимального положения противовеса и «мертвых точек», которые не требуют установки на станок внешних датчиков, могут работать в составе программного обеспечения интеллектуальных станций управления штанговых глубинных насосных установок, обеспечивая простоту контроля, обслуживания и сокращение издержек.

Ключевые слова:

Нефтяная промышленность, штанговая глубинная насосная установка, станок-качалка, асинхронный двигатель, преобразователь частоты, контроллер, интеллектуальная станция управления, ваттметрограмма, коэффициент уравниваемости, противовес, мертвая точка, диагностика.

Введение

Промышленное применение асинхронного электропривода достаточно широко. Это утверждение полностью справедливо и в отношении сферы нефтедобычи, где подавляющее число механизмов, выполняющих основную полезную работу, составляют штанговые глубинные насосные установки (ШГНУ). ШГНУ представляет собой комплекс оборудования для механизированного подъема жидкости из скважины с помощью погружного плунжерного насоса, которому сообщает возвратно-поступательное движение через кривошипно-балансирный привод (станок-качалку), редуктор и клиноременную передачу асинхронный двигатель [1–3].

Распространенность данного способа добычи обусловлена такими преимуществами, как: высокий коэффициент полезного действия, эффективность применения при низком дебите скважины и на скважинах с тяжелыми условиями добычи (в пескопроявляющих скважинах, при высоком со-

держании в добываемой нефти парафинов и газа), относительная простота и надёжность конструкции, возможность проведения ремонтных работ, обслуживания и регулировки непосредственно на объекте работниками низкой квалификации, малое влияние физико-химических свойств поднимаемой жидкости на работу ШГНУ [4].

В силу распространенности ШГНУ внедрению энергосберегающих технологий их эксплуатации в последнее время уделяется особое внимание. Несмотря на то, что привод основного числа установок остаётся нерегулируемым, наблюдается тенденция к всё большему внедрению преобразователей частоты, что позволяет применять новые экономичные способы управления [5]. Одним из путей реализации данного подхода стали интеллектуальные станции управления. Они характеризуются расширенным функционалом по сбору, обработке, анализу и передаче информации, отказом от использования дополнительных датчиков, продвинутыми алгоритмами управления.

Необходимость использования в станции управления алгоритмов, позволяющих отказаться от установки дополнительных датчиков помимо тех, что уже содержатся в преобразователе частоты (датчики тока и напряжения), имеет конкретные технологические предпосылки. Ключевым средством диагностики ШГНУ является динамометрирование. Данное средство даёт максимально полную информацию как о состоянии самого погружного насоса, такую как: обрыв штанг, залипание либо пропускание всасывающего или нагнетательного клапана, низкая посадка плунжера, его выход из цилиндра невставного насоса, удар о верхнюю ограничительную гайку вставного насоса; так и о режиме его работы: превышение подачи насоса над притоком жидкости в скважину и степень влияния газа, фонтанирование жидкости через насос.

Получение динамограммы обеспечивается специальным прибором – динамографом, который оснащён внешними датчиками усилия и перемещения. Датчик усилия устанавливается на балансире, на штоке или чаще всего между траверс канатного подвеса штока. Датчик перемещения, как правило, располагается на штоке или на кривошипе. Таким образом, датчики динамографа располагаются на элементах конструкции, находящихся в непрерывном движении, поэтому гибкий подвод кабеля подвержен быстрому перетиранию, износу и риску обрыва массивными движущимися частями конструкции [6, 7].

Распространённым решением указанных проблем является отказ от применения стационарных динамографов и переход на переносные динамографы, которые передаются в распоряжение мобильных бригад технического обслуживания. Такой подход также сопряжён с рядом недостатков: во-первых, установка такого динамографа требует полной остановки станка и разведения траверс подвеса штанг, что приводит и к потерям в добыче, во-вторых, проведение плановых проверок не может обеспечить своевременного обнаружения неоптимальной настройки ШГНУ, что также приводит к дополнительным потерям. Таким образом, отчетливо видна необходимость перехода к более простому в реализации, точному и надёжному способам диагностики, не требующим установки внешних навесных датчиков, основой которых может стать ваттметрирование [8–11].

Известные способы

Одним из основных параметров настройки станка-качалки является положение противовеса. Вес противовеса уравнивает нагрузку на штоке ШГНУ, которая определяется динамическим уровнем, диаметром плунжера, плотностью жидкости и весом штанг в жидкости. Динамический уровень представляет собой глубину от устья скважины, на которой устанавливается уровень пластовой жидкости в затрубном пространстве при работе насоса. При изменении притока жидкости в скважину меняется соответственно и динамиче-

ский уровень, при этом положение противовеса становится неоптимальным, что приводит к дополнительным потерям. Таким образом, до следующего технического обслуживания, при котором будет проведена балансировка станка качалки, установка будет работать с повышенными потерями. Кроме того, определение оптимального положения противовеса, как правило, ведётся по максимальному отклонению стрелки амперметра при ходе штока вверх и вниз [12]. Такая процедура настройки требует неоднократного повторения трудоёмкого перемещения противовеса, пока не будет подобрано наиболее оптимальное положение, точность определения которого, так или иначе, будет невысокой.

Поскольку стандартного подхода к определению уравниваемости станка-качалки в настоящее время не существует, далее рассмотрим различные предлагаемые способы решения данной проблемы. Известны несколько способов определения уравниваемости станка-качалки, отличающихся по своей методологии. В руководствах по эксплуатации нефтяных скважин традиционно даются указания по определению коэффициента уравниваемости с помощью токоизмерительных клещей [13]. Согласно руководству, необходимо определить максимальные значения тока при ходе штока штанговой установки вверх I_B и вниз I_H , затем найти коэффициент неуравновешенности станка-качалки:

$$K_{н.л} = \frac{I_B - I_H}{I_B + I_H} \cdot 100 \text{ \%}.$$

Недостаток данного способа заключается в существенной инерционности токоизмерительных клещей, откуда следует погрешность в определении коэффициента уравниваемости и неоднозначность в его значении при сильной разбалансировке станка-качалки.

Известен способ [14], где в качестве исходных данных использует мгновенные значения тока и напряжения на входе электропривода, на основе которых рассчитывают потребляемую реактивную мощность и проводят её гармонический анализ, а затем находят отношение второй гармоники к первой и значение полученного коэффициента сравнивают с эталонным для данной скважины.

Способ [15] заключается в том, что с эталонным значением среднеквадратичного отклонения полной мощности сравнивают среднеквадратичное отклонение полной мощности, определенное из произведения действующих значений тока и напряжения, вычисленных при минимальном или максимальном смещении штока от точки подвеса и при производной значения давления, не равной нулю, вычисленных по величине перемещения штока и мгновенному значению давления. Недостатками данных способов являются: сложность проведения гармонического анализа с использованием процедуры дискретного преобразования Фурье в первом способе, необходимость установки на

шток ШГНУ датчиков перемещения и давления во втором, а также необходимость использования эталонных коэффициентов, расчет которых необходимо предварительно проводить для каждой исследуемой установки.

Также известен способ [16], где решение поставленной задачи заключается в измерении мгновенных значений скорости вращения ротора приводного электродвигателя за один период качания, определении минимальных значений мгновенной скорости при подъеме $V_{1\min}$ и опускании $V_{2\min}$ штока, сравнении этих значений и определении состояния уравниваемости из условия:

$$|V_{1\min} - V_{2\min}| < \frac{0,1(V_{1\min} + V_{2\min})}{2}.$$

Недостатком способа является невозможность дать количественную оценку степени уравниваемости.

Согласно способу [17], коэффициент неуравниваемости определяется по максимальным мгновенным значениям активной мощности при ходе штока вверх $P_{B\max}$ и вниз $P_{H\max}$:

$$K_{H.P} = \frac{(P_{B\max} - P_{H\max})}{(P_{B\max} + P_{H\max})} \cdot 100 \, \%.$$

Общим недостатком способов [16, 17] является то, что для определения уравниваемости используются мгновенные значения скорости или мощности, а не интегральная оценка на периоде качания ШГНУ, такая как, например, энергия. Это не позволяет получить вполне точный результат по балансировке ШГНУ с точки зрения главного критерия уравниваемости – минимума потребляемой энергии.

В способе [18] в качестве интегрального показателя качества уравнивания предложен коэффициент уравниваемости по потерям, определяемый отношением средних потерь при ходе штока вверх $\Delta P_{CP.B}$ и вниз $\Delta P_{CP.H}$:

$$K_{ур.\Delta P} = \frac{\Delta P_{CP.B}}{\Delta P_{CP.H}},$$

наряду с которым может быть использован коэффициент уравниваемости по среднеквадратичному току при ходе штока вверх $I_{CP.B}$ и вниз $I_{CP.H}$:

$$K_{ур.I} = \frac{I_{CP.B}}{I_{CP.H}}.$$

Недостатком способа является то, что при обработке и восприятии информации необходимо оперировать численным значением коэффициента уравниваемости, которое может принимать отрицательные значения, что вызывает определенные трудности для эксплуатирующего персонала. Кроме того, для реализации данного способа предлагается оборудовать механизм датчиком положения или путевыми датчиками для определения моментов прохождения механизмом «мертвых точек», что усложняет конструкцию установки и снижает её надежность, поскольку навесные дат-

чики на подвижной конструкции подвержены сильным внешним воздействиям.

Общим недостатком всех указанных выше способов является то, что информация о коэффициенте уравниваемости, получаемая при этом, не содержит конкретных рекомендаций обслуживающему персоналу, куда и на сколько необходимо переместить противовес станка-качалки, поэтому требуется проводить несколько операций последовательного подбора оптимального положения.

Алгоритм определения уравниваемости

Для разработки алгоритма определения уравниваемости станка-качалки требуется глубокое понимание принципов и закономерностей работы штанговой глубинной насосной установки в целом. Такое понимание может обеспечить компьютерная модель ШГНУ [19–23], выполненная например, в среде PascalABC.NET, более подробное описание которой дано в работе [24, 25]. Общий вид исследуемой модели ШГНУ типа ПШГН8–3–5500, оснащенной двигателем 4A200L6Y3 (30 кВт, 1000 об/мин), представлен на рис. 1. Основными параметрами для моделирования являются геометрические размеры элементов конструкции станка-качалки, их массы, параметры упругости штанговой колонны, глубина спуска и диаметр насоса, динамический уровень и плотность жидкости в скважине, передаточные отношения редуктора и клиноременной передачи, параметры Т-образной схемы замещения двигателя и параметры силового преобразователя. Она позволяет получать визуальное представление о движении механизма и параллельно выводить динамограмму, ваттметрограмму, диаграмму момента двигателя и её составляющие от сил тяжести противовеса и оголовка по отдельности, а также расчет энергии, потребляемой за цикл качания.

Широкие возможности компьютерной модели обеспечивают доступность необходимых выходных переменных, что позволяет перейти к статистической обработке получаемых данных. Основным критерием в определении уравниваемости станка-качалки был выбран показатель минимального энергопотребления. В основу разработки алгоритма положены утверждения отдельных авторов [17, 26], а также результаты собственных исследований, из которых следует, что оптимальным условием уравнивания по минимуму потребляемой электроприводом ШГНУ энергии является равенство энергий, затрачиваемых на подъем и опускание штока. Для проверки данного утверждения в модели ШГНУ при установившемся режиме работы оценивалась энергия, потребляемая электроприводом при ходе штока вверх и вниз, с изменением радиуса расположения противовеса на кривошипе с шагом 0,01 м от одного крайнего положения до другого (повторение подобного эксперимента на реальной установке невозможно в силу конструктивно ограниченного количества мест установки противовеса на кривошипе).

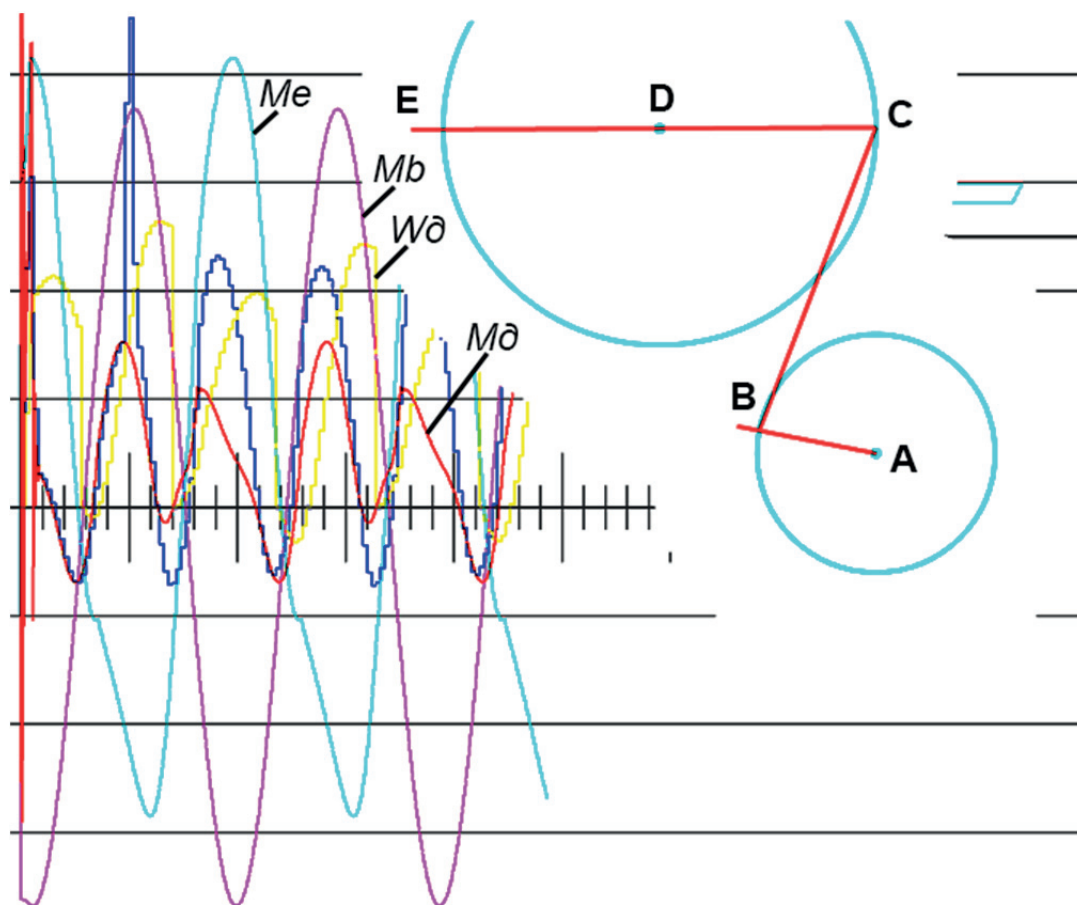


Рис. 1. Общий вид модели ШГНУ в среде PascalABC.NET

Fig. 1. Sucker-rod pumping unit (SRPU) model common view in PascalABC.NET environment

На рис. 2 представлены расчетные зависимости потребляемой электроприводом ШГНУ энергии от радиуса установки противовеса, полученные при указанных выше условиях моделирования для скважины со следующими параметрами:

- глубина спуска насоса 1142 м;
- динамический уровень 800 м.

Как видно на рис. 2, графики зависимости энергий, затрачиваемых на подъем W_B и опускание штока W_H , от радиуса расположения противовеса на исследуемом участке представляют собой прямые, а зависимость полной энергии W_{Σ} за цикл качания станка-качалки, которая является суммой энергий, затрачиваемых на ход штока вверх и вниз, от радиуса имеет параболический характер. На параболическом графике полной энергии есть точка минимума, координата которой по горизонтальной оси и даёт оптимальный радиус расположения противовеса $R_{\Sigma}=1,2$ м. Точка пересечения прямых дает значение радиуса $R_{\Sigma}=1,25$ м, при котором равны затраты энергии на подъем и опускание штока. Как видим, радиусы можно считать приблизительно равными с погрешностью менее

5 %, при том, что разница полных энергий за цикл составляет менее 0,1 %.

Исходя из принятого положения, алгоритм оценки качества уравновешивания включает в себя вычисление энергии W_d , потребляемой двигателем при ходе штока вверх и вниз по общему выражению на основе данных о мгновенной мощности двигателя P_d , формируемых в контроллере преобразователя частоты:

$$W_d = \int_{t=0}^{T_{\Sigma}} P_d dt, \quad (1)$$

где T_{Σ} – временной интервал интегрирования (длительность подъема или опускания штока); dt – шаг интегрирования по времени при численном интегрировании.

Для разделения значений энергии при ходе вверх – W_B и вниз – W_H необходимо выполнять интегрирование мощности по выражению (1) на интервале движения штока вверх – $T_{\Sigma}=t_B$ и вниз – $T_{\Sigma}=t_H$.

Оценку качества уравновешивания для наглядности рекомендуется формировать в виде числового значения коэффициента уравновешенности $K_{ур}$:

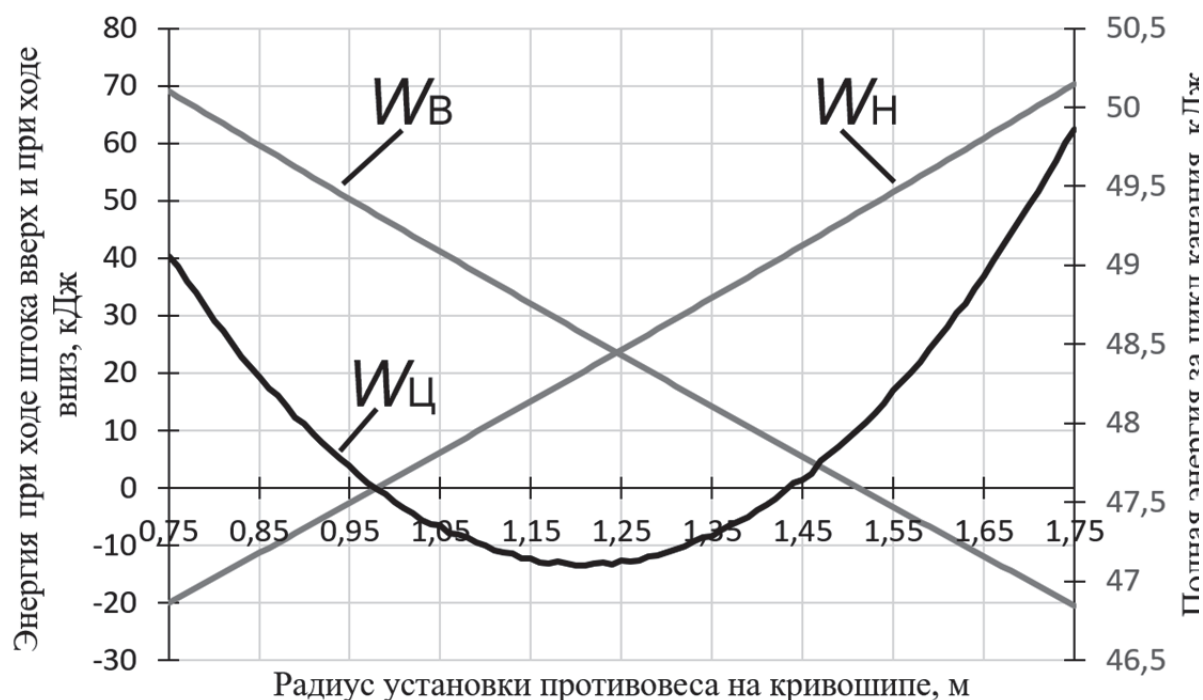


Рис. 2. Графики зависимости потребляемой энергии от положения грузов

Fig. 2. Plots of consumed energy vs. weights position

$$K_{yp} = \begin{cases} \frac{W_B + 1}{W_H + 1} \cdot 100\%, & \text{при } W_B \leq W_H; \\ \frac{W_H + 1}{W_B + 1} \cdot 100\%, & \text{при } W_H < W_B. \end{cases} \quad (2)$$

Очевидно, идеальному уравновешиванию соответствует значение коэффициента $K_{yp}=100\%$. При $K_{yp}<100\%$ установка считается неуравновешенной, причём чем меньше K_{yp} , тем сильнее разбалансирована ШГНУ. Небольшое отклонение K_{yp} от 100% при работе ШГНУ допускается, необходимость остановки механизма и перемещения противовеса в более оптимальное положение определяется в каждом конкретном случае текущими приоритетами и техническими возможностями. Минимальное значение $K_{yp}=0\%$ не достижимо на практике в силу конструктивного ограничения диапазона перемещения противовеса на кривошипе. Из формулы (2) также следует, что нет необходимости определять, при подъёме или при опускании штока измерена энергия, достаточно подставить в формулу два последовательных значения энергии за половину цикла согласно указанному условию.

Алгоритм определения оптимального положения противовеса

Из графиков на рис. 2 видно, что зависимости энергии, потребленной при ходе вверх и вниз, от радиуса противовеса имеют практически линейный характер. Кроме того, равны по модулю и от-

личны по знаку углы наклона этих прямых. При этом, как показали исследования на модели электропривода ШГНУ, угол наклона этих прямых не зависит от динамического уровня и глубины спуска насоса. Исходя из этого, зная тангенс наклона прямых и текущие значения энергий при ходе вверх и вниз, а также радиус противовеса, можно определить уравнения этих прямых. Определив уравнение хотя бы одной из прямых, мы можем рассчитать оптимальное по энергопотреблению положение противовеса.

Уравнения зависимости энергии при ходе вверх W_B и вниз W_H от радиуса противовеса могут быть представлены в следующем виде:

$$\begin{cases} W_B = -AR + B_B; \\ W_H = AR + B_H, \end{cases}$$

где A – тангенс угла наклона прямых; R – радиус противовеса; B_B и B_H – коэффициенты смещения прямых.

Для определения коэффициента A требуется как минимум две точки искомой прямой. Поэтому первый запуск ШГНУ будет «пробным»: при этом необходимо занести в память текущее значение радиуса противовеса, дать станку отработать некоторое время, например, пять циклов, и задать команду «Идентификация» для сохранения текущих параметров. После этого требуется остановить механизм, произвольно сдвинуть грузы на некоторую величину и запустить его снова, записав при этом в память новое значение радиуса. Значение коэффициента A находим по следующим выражениям:

$$A_{\text{A}} = \frac{W_{\text{BB}} - W_{\text{B}}}{R_{\text{D}} - R};$$

$$A_{\text{I}} = \frac{W_{\text{HH}} - W_{\text{H}}}{R_{\text{D}} - R};$$

$$A = \frac{A_{\text{H}} - A_{\text{B}}}{2},$$

где W_{BB} , W_{HH} , R – значения энергии и радиуса противовеса, полученные на предварительном запуске.

При выполнении указанных условий алгоритм выдаст значение коррекции положения грузов для достижения оптимального энергопотребления – это будет в той точке, где энергия равняется половине полной энергии за цикл, что определяется следующим выражением:

$$R_{\text{yp}} = \frac{\frac{W_{\text{B}} + W_{\text{H}}}{2} - (W_{\text{B}} + AR)}{-A};$$

При этом величина смещения может быть получена из следующей формулы:

$$R_{\text{CM}} = R_{\text{yp}} - R.$$

В случае необходимости обновления результатов работы алгоритма следует задать команду «сброс» и повторить процедуру.

Алгоритм определения «мертвых точек»

Одним из главных недостатков некоторых способов определения уравниваемости является необходимость получения информации о положении штока от внешних датчиков. Как уже было сказано выше, применение таких датчиков значительно снижает надёжность системы в целом. Тем не менее, разработанные алгоритмы требуют нали-

чия информации о прохождении станком-качалкой «мертвых точек». Эту информацию также предлагается формировать на основе ваттметрограммы, относительно доступной для получения стандартными средствами станции управления ШГНУ.

Для этого логическому анализу были подвергнуты диаграммы момента двигателя, поскольку при практически постоянной скорости, на которой работает установка, диаграммы момента и мощности имеют одинаковую форму, с разницей только в масштабе друг относительно друга. Изучение форм диаграмм и различные их преобразования привели к следующим выводам: если текущую диаграмму момента (мощности) двигателя сложить с той же самой диаграммой, но сдвинутой на половину периода качания станка-качалки, то полученная диаграмма будет иметь вид, представленный на рис. 3, где показаны диаграммы суммарного момента при различных положениях противовеса ($M_{0,9}$, $M_{1,2}$, $M_{1,5}$, $M_{1,7}$). Сопоставим данную суммарную диаграмму с диаграммой момента M_0 , создаваемого на валу двигателя нагрузкой на оголовке станка-качалки, состоящей из веса оголовка и усилия на штоке. На рис. 3 видно, что абсциссы минимумов суммарной диаграммы соответствуют точкам перехода через ноль диаграммы момента оголовка, которые и показывают момент времени прохождения крайнего верхнего и крайнего нижнего положения балансира. Минимумы на графике суммарного момента несколько опережают по времени прохождение «мертвых точек», тем самым обеспечивается компенсация вычислительного запаздывания системы.

Таким образом, о прохождении станком-качалкой «мертвой точки» свидетельствуют минимумы на диаграмме суммы текущей мощности и мощно-

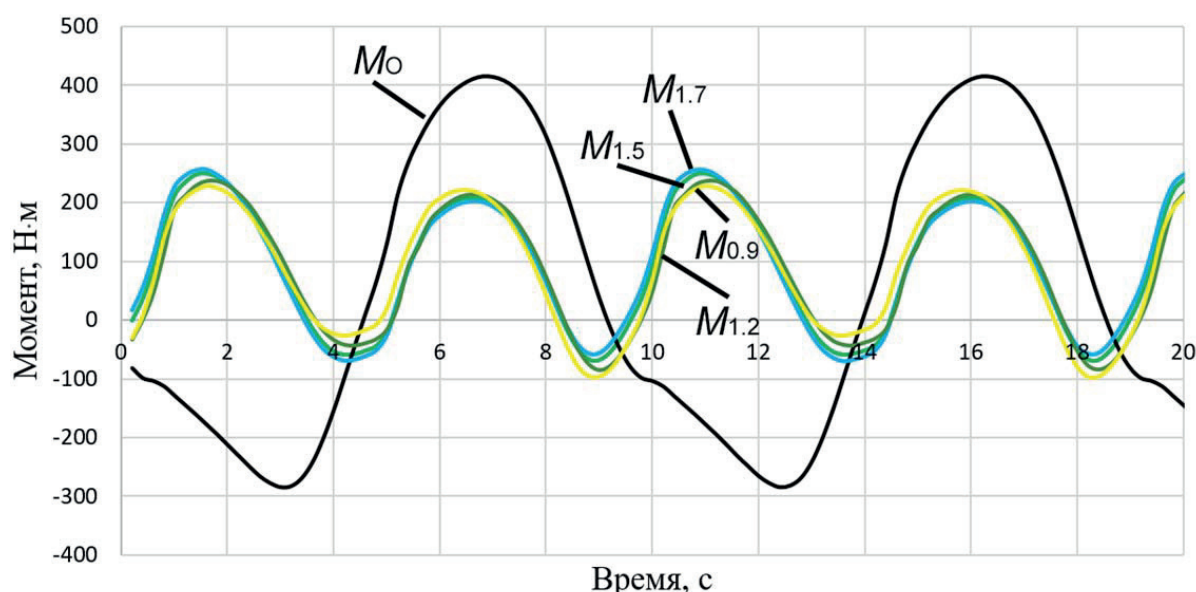


Рис. 3. Суммарная диаграмма моментов и диаграмма момента, создаваемого на валу двигателя оголовком с нагрузкой

Fig. 3. Summarized torques diagram and diagram of horse head torque on motor shaft under load

сти, измеренной в момент времени, предшествующий половине периода качания ШГНУ. Чтобы определить период качания балансира, не прибегая к внешним датчикам и методам визуально контроля, необходимо вычислить разность значений временных меток двух последовательных наибольших максимумов на диаграмме мощности.

На следующем шаге, необходимом для определения оптимального положения противовеса, требуется установить, какой временной интервал между «мертвыми точками» соответствует подъему, а какой – опусканию штока, иными словами – какая «мертвая точка» является верхней, а какая – нижней. Поскольку в моменты прохождения «мертвых точек» положения кривошипа станка-качалки несимметричны относительно центра его вращения, то измерив его угловой путь, можно однозначно определить тип «мертвой точки». При нормальном режиме работы ШГНУ проскальзывания в его передачах отсутствуют, поэтому можно перейти к определению углового перемещения вала двигателя, расчет которого ведётся интегрированием скорости вращения двигателя. Таким образом, с учетом геометрии станка-качалки устанавливаем, что верхней «мертвой точке» предшествует меньшее угловое перемещение вала двигателя, а нижней – большее.

Заключение

Анализ существующих подходов к диагностированию уравниваемости ШГНУ позволил выявить основные недостатки применяемых решений и сформулировать задачу настоящего исследования.

На компьютерной модели ШГНУ исследовано функционирование установки в различных режимах: при изменении параметров скважины – динамического уровня, конфигураций механизма, таких как глубина спуска насоса и положение противовеса на кривошипе; регулировании производительности – заданием различных скоростей вращения двигателя. Изучены закономерности процессов, протекающих в установленном режиме работы ШГНУ: колебания нагрузок на отдельных элементах конструкции станка-качалки, а также преобразование энергии на всех этапах цикла качания. Полученные зависимости представлены графически и подвергнуты аналитической обработке. На основе полученных результатов разработаны алгоритмы определения уравниваемости станка-качалки, оптимального положения противовеса и «мертвых точек».

Сформированный алгоритм является частью систем диагностики ШГНУ и может быть адаптирован для использования в интеллектуальных станциях управления, что в совокупности с удаленной диспетчеризацией обеспечивает простые и понятные выходные данные для мониторинга состояния ШГНУ, своевременное и качественное обслуживание оборудования, простоту, высокую скорость и точность настройки, которой нельзя добиться с использованием только лишь ручного труда, экономии на плановых проверках оборудования, а также значительное снижение затрат на потери электроэнергии от работы установки в неоптимальном режиме. Все эти преимущества достигаются при достаточно небольших затратах на внедрение и адаптацию алгоритма под конкретную интеллектуальную станцию управления ШГНУ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Арбузов В.Н. Эксплуатация нефтяных и газовых скважин. Ч. 2. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2012. – 272 с.
2. Лаврушко П.Н., Муравьев В.М. Эксплуатация нефтяных и газовых скважин. – М.: Недра, 1974. – 367 с.
3. Скважинные насосные установки для добычи нефти / В.И. Ивановский, В.И. Даритцев, А.А. Сабиров, В.С. Каштанов, С.С. Пекин. – М.: Нефть и Газ, 2002. – 824 с.
4. An approach to the optimum design of sucker-rod pumping system / X. Liu, Y. Qi, J. Wu, L. Yang, F. Chen // WASE International Conference on Information Engineering (ICIE). – Beidaihe, 2010. – V. 3. – P. 140–143.
5. Khakimyanov M.I., Shafikov I.N., Khusainov F.F. Control of sucker rod pumps energy consumption // IEEE Int. Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). – Omsk, 2015. – P. 1–4.
6. Бубнов М.В., Зюев А.М. Средства диагностирования оборудования установок штанговых глубинных насосов // Труды первой научно-технической конференции молодых ученых Уральского энергетического института. – Екатеринбург: УрФУ, 2016. – С. 175–178.
7. Сравнительный анализ возможностей отечественных и импортных систем автоматизации скважин, эксплуатируемых ШГН / М.И. Хакимьянов, С.В. Светлакова, Б.В. Гузев, Я.Ю. Соловьев, И.В. Музалев // Нефтегазовое дело. – 2008. – № 2. – С. 1–22.
8. Хакимьянов М.И., Пачин М.Г. Мониторинг состояния штанговых глубиннонасосных установок по результатам анализа ваттметрограмм // Нефтегазовое дело. – 2011. – № 5. – С. 1–26.
9. Building the dynamometer card of sucker rod pump using power consumption of the eclectic motor of pumping unit / G. Guluyev, A. Pashayev, F. Pashayev, A. Rzaev, E. Sabziev // Problems of Cybernetics and Informatics (PCI): IV International Conference. – Baku, 2012. – P. 1–3.
10. Generating surface dynamometer cards for a sucker-rod pump by using frequency converter estimates and a process identification run / T. Lindh, J.-H. Montonen, M. Grachev, M. Niemelä // IEEE 5th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives. – Riga, 2015. – P. 416–420.
11. Khakimyanov M.I., Khusainov F.F. The information processing of dynamometer cards at controllers of automation power drives sucker rod pumps // IEEE International Conference on Power Drives Systems (ICPDS). – Perm, 2015. – P. 1–6.
12. Привод штанговых глубинных насосов, Паспорт ПШГН.00.000.ПС. – Екатеринбург: Уралтрансаш, 1991. – 34 с.
13. Руководство по эксплуатации скважин штанговыми насосами. – Альметьевск: АО «Татнефть», 1992. – 440 с.
14. Способ диагностирования уравниваемости станков-качалок штанговых насосных установок: пат. Рос. Федерация № 2227848; заявл. 31.10.2002; опубл. 27.04.2004, Бюл. № 12. – 8 с.
15. Способ определения неуровненности станка-качалки скважинной штанговой насосной установки: пат. Рос. Федера-

- ция № 2621435; заявл. 03.02.2016; опубл. 06.06.2017, Бюл. № 16. – 6 с.
16. Способ диагностирования уравниваемости привода штангового глубинного насоса: пат. Рос. Федерация № 2334897; заявл. 09.01.2007; опубл. 27.09.2008, Бюл. № 27. – 4 с.
17. Хакимьянов М.И. Удельный расход электроэнергии при механизированной добыче нефти штанговыми глубиннонасосными установками // Вестник УГТУ. – 2014. – Т. 18. – № 2 (63). – С. 54–60.
18. Зюзев А.М. Развитие теории и обобщение опыта разработки автоматизированных электроприводов агрегатов нефтегазового комплекса: дис. ... д-ра техн. наук. – Екатеринбург, 2004. – 347 с.
19. Модели нагрузок для симуляторов реального времени электроприводов / А.М. Зюзев, М.В. Бубнов, М.В. Мудров, К.Е. Нестеров // Автоматизация в электроэнергетике и электротехнике. – 2016. – Т. 1. – С. 24–30.
20. The dynamic simulation model and the comprehensive simulation algorithm of the beam pumping system / S. Dong, Y. Cui, M. Xing, S. Liao, L. Du // International Conference on Mechanical and Automation Engineering (MAEE). – Jiujiang, 2013. – P. 118–122.
21. Hands-on model of sucker rod pumping facility for oil well production / K.F. Fozao, M. Lissouck, F. Lontsi, A. Ngasa, N. Mbanda // Journal of Petroleum and Gas Engineering. – 2015. – № 6 (4). – P. 45–53.
22. Sucker-rod pumping system: Simulator and dynamic level control using bottom hole pressure / B. Ordonez, A. Cotas, U.F. Moreno, A. Teixeira // Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA). – Hamburg, 2008. – P. 282–289.
23. Fuyu W., Guoming C. The virtual experiment system of sucker-rod pumping development and its application // Computing, Control and Industrial Engineering (CCIE). – Wuhan, 2010. – V. 2. – P. 178–181.
24. Zyuzev A.M., Bubnov M.V. Mudrov M.V. Sucker-Rod Pump Unit Electric Drive Simulator // 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). – Chelyabinsk, 2016. – P. 1–4.
25. 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 – № 944. – P. 1–7.
26. Хакимьянов М.И., Хусаинов Ф.Ф., Шафиков И.Н. Зависимость энергопотребления штанговых глубинных насосов от технологических параметров скважин // Нефтегазовое дело. – 2015. – № 1. – С. 533–563.

Поступила 18.10.2018 г.

Информация об авторах

Зюзев А.М., доктор технических наук, профессор кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина.

Бубнов М.В., аспирант, инженер кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина.

UDC 622.276.53

SUCKER-ROD PUMPING UNIT BALANCE DIAGNOSTICS BY WATTMETER CARD

Anatoliy M. Zyuzev¹,

a.m.zyuzev@urfu.ru

Matvei V. Bubnov¹,

m.v.bubnov@urfu.ru

¹ Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin,
19, Mira Street, Yekaterinburg, 620002, Russia.

The relevance of the research is conditioned by widespread use of unregulated sucker-rod pumping units, equipped only with mechanical adjustment tools. Application of that type of units results in considerable losses of both electricity and crude oil related to machine operating in non optimal regime. To solve this problem both new and already exploited sucker-rod pumping units are equipped with means of intelligent control and monitoring, which are included within control stations equipped with frequency converter and controller. Implementation of these tools on sucker-rod pumping units control station controller requires the development of appropriate algorithms to ensure autonomous, high performance, cost-effective and reliable function of plant during all life cycle.

The main aim of the research is elaboration of the algorithms for determining pumpjack balance, optimal counterbalance position and polished rod dead centres passing moment.

Objects of the research are the sucker-rod pumping unit in different operating modes and pumpjack balance, defined by the counterbalance position on the crank.

Methods: mathematical analysis tool of differential equations and transfer functions, computer simulation, comparison and analysis of charts and diagrams.

Results. The paper considers the existing ways of pumpjack balance detection and their shortcomings. It turns out that wattmetering is the most available and fail-safe sucker-rod pumping unit condition monitoring method which does not require installation of additional external sensors. The authors have developed the sucker-rod pumping unit computer model for investigating principles and load cycles of unit operation. Based on the data obtained by simulations the authors developed the algorithm of pumpjack balance detection, which can work as sucker-rod pumping unit intelligent control station software ensuring easy control, timely service and cost reduction.

Key words:

Oil industry, sucker-rod pumping unit, pumpjack, induction motor, frequency converter, controller, intelligent control station, wattmeter card, balance ratio, counterweight, dead centre, diagnostics.

REFERENCES

1. Arbuzov V.N. *Ekspluatatsiya neftyanykh i gazovykh skvazhin* [Exploitation of oil and gas wells]. P. 2. Tomsk, Tomsk Polytechnic University Publ. house, 2012. 272 p.
2. Lavrushko P.N., Muraviev V.M. *Ekspluatatsiya neftyanykh i gazovykh skvazhin* [Exploitation of oil and gas wells]. Moscow, Nedra Publ., 1974. 367 p.
3. Ivanovsky V.I., Darittsev V.I., Sabirov A.A., Kashtanov V.S., Pekin S.S. *Skvazhinnye nasosnye ustanovki dlya dobychi nefi* [Downhole pumping units for oil production]. Moscow, Neft i gaz Publ., 2002. 824 p.
4. Liu X., Qi Y., Wu J., Yang L., Chen F. An approach to the optimum design of sucker-rod pumping system. *WASE International Conference on Information Engineering (ICIE)*. Beidaihe, 2010. Vol. 3, pp. 140–143.
5. Khakimyanov M.I., Shafikov I.N., Khusainov F.F. Control of sucker rod pumps energy consumption. *IEEE Int. Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON)*. Omsk, 2015. pp. 1–4.
6. Bubnov M.V., Zyuzev A.M. Sredstva diagnostirovaniya oborudovaniya ustanovok shtangovykh glubinnnykh nasosov [Sucker-rod pumping units equipment diagnosing facilities]. *Trudy pervoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii molodykh uchenykh Uralskogo energeticheskogo instituta* [Proc. of the first scientific and technical conference of young scientists of the Ural Power Engineering Institute]. Yekaterinburg, UrFU Publ., 2016. pp. 175–178.
7. Khakimyanov M.I., Svetlakova S.V., Guzev B.V., Solov'ev Ya.Yu., Muzalev I.V. Sravnitelny analiz vozmozhnostey otechestvennykh i importnykh sistem avtomatizatsii skvazhin, ekspluatiruemykh ShGN [Comparative analysis of the capabilities of domestic and imported well automation systems operated by SRP]. *Neftegazovoe delo*, 2008, no. 2, pp. 1–22.
8. Khakimyanov M.I., Pachin M.G. Monitoring of sucker rod pump units on result of the analysis wattmeter cards. *Oil and gas industry*, 2011, no. 5, pp. 1–26. In Rus.
9. Guluyev G., Pashayev A., Pashayev F., Rzayev A., Sabziev E. Building the dynamometer card of sucker rod pump using power consumption of the eclectic motor of pumping unit. *Problems of Cybernetics and Informatics (PCI): IV International Conference*. Baku, 2012. pp. 1–3.
10. Lindh T., Montonen J.-H., Grachev M., Niemelä M. Generating surface dynamometer cards for a sucker-rod pump by using frequency converter estimates and a process identification run. *IEEE 5th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives*. Riga, 2015. pp. 416–420.
11. Khakimyanov M.I., Khusainov F.F. The information processing of dynamometer cards at controllers of automation power drives sucker rod pumps. *IEEE International Conference on Power Drives Systems (ICPDS)*. Perm, 2015. pp. 1–6.
12. *Privod shtangovykh glubinnnykh nasosov* [Rod deep pumps actuator]. Passport PShGN.00.000.PS. Yekaterinburg, Uraltransmash Publ., 1991. 34 p.
13. *Rukovodstvo po ekspluatatsii skvazhin shtangovymi nasosami* [Manual on operation of wells with sucker-rod pumps]. Almet'yevsk, Tatneft Publ., 1992. 440 p.
14. Goldshteyn E.I., Isachenko I.N., Polyakova S.V. *Sposob diagnostirovaniya uravnoveshennosti stankov kachalok shtangovykh nasosnykh ustanovok* [The method for diagnosing the balance of the pumpjack of rod pump units]. Patent RF, no. 2227848, 2004.
15. Timofeev A.O., Yasoveev V.Kh. *Sposob opredeleniya neuravnoveshennosti stanka kachalki skvazhinnoy shtangovoy nasosnoy*

- ustanovki* [The method for determining the unbalance of a pump-jack of a borehole rod pump unit]. Patent RF, no. 2621435, 2017.
16. Ushakov V.S., Demyanenko N.A. *Sposob diagnostirovaniya uravnoveshennosti privoda shtangovogo glubinnogo nasosa* [The method for diagnosing the balance of a rod depth pump acuator]. Patent RF, no. 2334897, 2008.
 17. Khakimyanov M.I. Energy intensity in artificial lift of sucker rod pumping units. *Vestnik UGATU*, 2014, vol. 18, no. 2 (63), pp. 54–60. In Rus.
 18. Zyuzev A.M. *Razvitie teorii i obobshchenie opyta razrabotki avtomatizirovannykh ehlektroprivodov agregatov neftegazovogo kompleksa*. Dis. Dokt. nauk [Development of the theory and generalization of experience in the development of automated electric drives for oil and gas units. Dr. Diss.]. Yekaterinburg, 2004. 347 p.
 19. Ziuzev A.M., Bubnov M.V., Mudrov M.V., Nesterov K.E. Load models for real-time simulators of electric drives. *Automation in the Electric Power Industry and Electrical Engineering*, 2016, vol. 1, pp. 24–30. In Rus.
 20. Dong S., Cui Y., Xing M., Liao S., Du L. The dynamic simulation model and the comprehensive simulation algorithm of the beam pumping system. *International Conference on Mechanical and Automation Engineering (MAEE)*. Jiujang, 2013. pp. 118–122.
 21. Fozao K.F., Lissouck M., Lontsi F., Ngasa A., Mbanda N. Hands-on model of sucker rod pumping facility for oil well production. *Journal of Petroleum and Gas Engineering*, 2015, no. 6 (4), pp. 45–53.
 22. Ordenez B., Codos A., Moreno U.F., Teixeira A. Sucker-rod pumping system: Simulator and dynamic level control using bottom hole pressure. *Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*. Hamburg, 2008. pp. 282–289.
 23. Fuyu W., Guoming C. The virtual experiment system of sucker-rod pumping development and its application. *Computing, Control and Industrial Engineering (CCIE)*, Wuhan, 2010, vol. 2, pp. 178–181.
 24. Zyuzev A.M., Bubnov M.V., Mudrov M.V. Sucker-Rod Pump Unit Electric Drive Simulator. *2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*. Chelyabinsk, 2016. pp. 1–4.
 25. 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, no. 944, pp. 1–7.
 26. Khakimyanov M.I., Khusainov F.F., Shafikov I.N. Technological parameters influence of oilwells on energy consumption sucker rod pumps. *Oil and gas industry*, 2015, no. 1, pp. 533–563. In Rus.

Received: 18 October 2018.

Information about the authors

Anatoliy M. Zyuzev, Dr. Sc., professor, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin.

Matvei V. Bubnov, graduate student, engineer, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin.