УДК 62-529

Д.С. Торгаева, М.П. Сухоруков, Ю.А. Шурыгин, Ю.А. Шиняков, Н.А. Шаляпина

Имитационное моделирование установки штангового глубинного насоса для добычи нефти

Разработана имитационная модель, описывающая установку штангового глубинного насоса как замкнутую систему. Разработка модели производилась с целью исследования влияния изменения положения динамического уровня в затрубном пространстве нефтяной скважины и различных неисправностей погружного оборудования на форму сигнала ваттметрограммы для разработки алгоритмов управления и диагностики УШГН.

Ключевые слова: имитационная модель, штанговый глубинный насос, электромеханический привод, система управления, ваттметрограмма, динамический уровень жидкости.

doi: 10.21293/1818-0442-2019-22-3-71-78

Большинство современных систем управления установками штанговых глубинных насосов (УШГН) используют методы, основанные на косвенном измерении динамического уровня жидкости в затрубном пространстве нефтяной скважины для управления подачей установки, а также методы динамометрирования для диагностики неисправностей штангового глубинного насоса и ваттметрирования для диагностики наземного оборудования [1, 2]. Недостатком такого подхода является необходимость использования большого количества датчиков физических величин, что ведет к увеличению стоимости системы управления и снижению ее надежности.

В настоящее время все большую популярность набирают «бездатчиковые» системы управления установками штанговых глубинных насосов [3, 4]. Данные системы предполагают выполнение алгоритмов управления только на основании измерения и обработки сигналов датчиков электрических величин (напряжение и ток обмоток двигателя, потребляемая приводом мощность (ваттметрограмма)). Поскольку ваттметрограмма отражает изменение нагрузки на установку штангового глубинного насоса во времени, метод ваттметрирования позволяет создавать на его основе алгоритмы управления и диагностики, требующие наличия в системе только датчиков электрических величин [5]. Однако существенным недостатком ваттметрирования как метода является сложность математического анализа. В связи с этим существующие решения в области создания алгоритмов управления и диагностики требуют либо реализации сложных математических моделей объекта управления, что подразумевает предварительное измерение и ввод в систему большого количества параметров этого объекта, зачастую переменных во времени, либо предварительного исследования каждого конкретного объекта с целью выявления различных диагностических параметров и коэффициентов.

Предлагаемым авторами решением обозначенных проблем является разработка методов и алгоритмов управления, позволяющих управлять установкой штангового глубинного насоса, исходя из анализа реакции объекта управления на изменение

управляющего воздействия. Для изучения реакции объекта управления (установки штангового глубинного насоса и подсистемы «пласт – скважина») на изменение различных параметров оборудования и скважины, а также для выявления характерных для различных неисправностей изменений формы ваттметрограммы необходима разработка имитационной модели объекта управления.

Обзор литературы показал, что в настоящее время существует множество работ, направленных на создание имитационных моделей отдельных узлов УШГН. Однако имитационных моделей, описывающих УШГН как замкнутую систему в совокупности с подсистемой «пласт – скважина» и системой управления, достаточно мало. Известна модель [6], описывающая систему с использованием элементарной теории, которая имеет низкую степень адекватности, что не позволит получать ваттметрограммы, отражающие всю необходимую информацию о состоянии объекта управления.

Имитационная модель, описывающая установку с использованием точной теории, представлена в работе [7]. Существенным недостатком этой модели является то, что она не учитывает возможное выравнивание забойного и пластового давлений и срыв подачи насоса при снижении динамического уровня до приема ШГН, а также то, что имитационная модель ШГН представлена в виде электрической схемы замещения, что ограничивает возможность моделирования различных неисправностей ШГН. В связи с этим существует необходимость создания имитационной модели УШГН, описывающей ее как замкнутую систему с возможностью моделирования различных неисправностей данной установки.

Описание имитационной модели

Управляющим воздействием для УШГН является изменение частоты фазного напряжения на обмотках асинхронного электродвигателя. Исходя из этого, разработана имитационная модель, отражающая изменение динамического уровня жидкости и потребляемой приводом мощности в ответ на изменение частоты фазного напряжения. Объект управления представляет собой сложную систему пласт – скважина – ШГН – электромеханический привод,

параметры и состояния которой связаны между собой (рис. 1). Для упрощения математического описания объекта каждый узел рассматривается как отдельная подсистема (отдельный объект управления). Связи с другими элементами УШГН являются для

такого объекта входными сигналами (управляющими и возмущающими воздействиями). Реакция объекта на входные воздействия, в свою очередь, является входным сигналом для других элементов системы.

Рис. 1. Структурно-функциональная схема объекта управления: Q – подача ШГН; s_A – закон движения полированного штока; ω_d – угловая скорость вращения вала двигателя; f_y – частота управляющего сигнала, задаваемая системой управления; M_c – момент сопротивления на валу электродвигателя; $G_{шт}$ – усилия на полированном штоке; $H_{дин}$ – динамический уровень жидкости в затрубном пространстве нефтяной скважины; P – величина средней за период качания балансира потребляемой приводом мощности

Имитационная модель пласт – скважина

Модель описывает подсистему «пласт – скважина – штанговый глубинный насос». Управляющим воздействием для данной подсистемы является изменение количества откачиваемой жидкости (расход жидкости ШГН), а реакцией на воздействие – изменение уровня жидкости в затрубном пространстве нефтяной скважины.

Описание данного взаимодействия неоднократно приводилось в работах, посвященных разработке систем управления УШГН [2, 10], но разработанные модели учитывают лишь влияние параметров, характеризующих производительность ШГН (количество двойных ходов в минуту, длина хода полированного штока, диаметр плунжера и коэффициент заполнения насоса), и теоретического дебита на положение динамического уровня. Однако изменение динамического уровня оказывает существенное влияние на величину забойного давления, что в свою очередь влияет на скорость притока пластовой жидкости, а значит, и на дебит скважины.

Исходя из уравнения расхода жидкости в системе и формулы Дюпюи, получено следующее уравнение для динамического уровня жидкости в затрубном пространстве [11]:

$$H_{дин}(t) = \frac{1}{\pi(r_c - r_{НКТ})^2} \times \int_0^t \left(\frac{2\pi k h (p_0 - p_{заб}(t))}{\mu \ln \frac{R_k}{r_c}} - v_{пл} S_{пл} \beta \right) dt + H_{дин}(0), \quad (1)$$

где μ – динамическая вязкость жидкости (Па·с); k – коэффициент проницаемости пласта (мД); h – толщина продуктивного пласта (м), через который происходит фильтрация; p_0 – пластовое давление (давление на приеме контура питания скважины) (Па); $p_{заб}$ – забойное давление (давление на границе зоны фильтрации) (Па); R_k – радиус контура питания (м), r_c – радиус скважины (м); $S_{пл}$ – площадь сечения плунжера (м²); n – число двойных ходов в минуту;

$v_{пл}$ – скорость плунжера (м/с); β – коэффициент наполнения насоса ($\beta \in [0, 1]$) [12]; $H_{дин}$ – положение динамического уровня (м); $r_{НКТ}$ – внешний радиус колонны насосно-компрессорных труб (НКТ) (м); S_3 – площадь сечения пространства между внутренней поверхностью скважины и внешней поверхностью колонны НКТ (м²); $H_{дин}(0)$ – начальное значение динамического уровня (м). Имитационная модель узла системы «пласт – скважина» представлена на рис. 2.

Имитационная модель штангового глубинного насоса

Имитационная модель штангового глубинного насоса представляет собой математическую модель подсистемы «скважина – штанговая колонна – плунжер – столб жидкости – колонна насосно-компрессорных труб – станок-качалка». Управляющим воздействием для системы является изменение закона перемещения полированного штока (точки подвеса штанг (ТПШ)). Возмущающим воздействием является изменение динамического уровня в затрубном пространстве нефтяной скважины, а реакцией системы на управляющее воздействие – изменение длины хода и скорости плунжера, которое вызывает изменение расхода жидкости (1), а также усилия в ТПШ. Имитационная модель штангового глубинного насоса построена на базе математической модели ШГН, описанной в ряде работ [13, 14]. Имитационная модель штангового глубинного насоса представлена на рис. 3.

Рис. 2. Имитационная модель «пласт – скважина»: Q – подача ШГН; $H_{дин}$ – динамический уровень жидкости

Рис. 3. Имитационная модель штангового глубинного насоса: s_A – положение полированного штока; $H_{дин}$ – динамический уровень жидкости; G_{sht} – усилие, действующее на шток; Q – подача ШГН

Имитационная модель станка-качалки

Имитационная модель станка-качалки (СК) описывает взаимодействие подсистемы «полированный шток – балансир – четырехзвенный механизм – система уравнивания – кривошип – вал электродвигателя». Данная подсистема показывает взаимосвязь между усилием, приложенным к полированному штоку, и моментом сопротивления на валу электродвигателя. При этом управляющим воздействием является изменение угловой скорости вращения вала электродвигателя, возмущающим воздействием – изменение усилия в ТПШ, а реакцией системы на управляющее воздействие – изменение закона перемещения ТПШ и момента сопротивления на валу электродвигателя. Модель разделена на два блока: блок задания закона движения точки подвеса штанг и блок расчета момента сопротивления на валу электродвигателя.

Зачастую для построения имитационной модели ШГН закон движения точки подвеса штанг принимается за гармонический, однако на практике движение этой точки подвеса штанг подчиняется более сложному закону и напрямую зависит от параметров и кинематической схемы используемого станка-качалки. Для устранения данного допущения необходимо ввести закон движения ТПШ при заданном законе движения кривошипа станка-качалки, т.е. привести решение прямой задачи кинематики [15].

На рис. 4 представлена кинематическая схема станка-качалки с двуплечим балансиром. Закон движения точки подвеса штанг (точка A) для данной схемы описывается системой уравнений (2) [16].

Рис. 4. Кинематическая схема станка-качалки с двуплечим балансиром:

k_1 – длина переднего плеча балансира;
 k – длина заднего плеча балансира; l – длина штанги;
 p – кратчайшее расстояние между центром качания балансира и центром вращения кривошипа; r – радиус кривошипа; $\varphi_{кр}$ – угол поворота кривошипа относительно направления p ; φ_0 – угол между вертикалью и направлением p ; c – проекция p на горизонтальную плоскость; b – проекция p на вертикальную плоскость; γ – угол поворота заднего плеча балансира относительно p ; α – угол между кривошипом и штангой; β – угол между задним плечом балансира и штангой; θ – угол отклонения балансира от горизонтального положения

$$\begin{cases} s_A(t) = k_1 \left(\arccos \frac{k^2 + p^2 - (l+r)^2}{2kp} - \gamma(t) \right); \\ \varphi_0 = \arctg \frac{c}{b}; \\ \varphi = \pi - \arccos \left(\frac{p^2 - k^2 + (l+r)^2}{2p(l+r)} \right) - \omega_{кр} t; \\ \gamma(t) = \arctg \frac{\sin \varphi(t)}{\frac{p}{r} + \cos \varphi(t)} + \arctg \frac{\sin \beta(t)}{\frac{k}{l} - \cos \beta(t)}; \\ \beta(t) = \arccos \left(\frac{(l^2 - p^2) + (k^2 - r^2)}{2lk} - \frac{pr}{lk} \cos \varphi(t) \right). \end{cases} \quad (2)$$

Для расчета момента сопротивления на валу электродвигателя необходимо произвести динамический анализ станка-качалки для определения крутящего момента на кривошипе. Условно теории динамического анализа балансирных станков качалок можно разделить на элементарную, уточненную и точную. Метод расчета динамики станка-качалки, использующий элементарную теорию, приведен в [17], метод является наиболее простым и справедлив только с учетом следующих допущений:

- точка сочленения шатуна и заднего плеча балансира движется по прямой;
- угол отклонения шатуна от вертикали принимается равным 0.

Данные допущения справедливы только для аксиальных кинематических схем станков-качалок с длиной балансира много меньше радиуса кривошипа. Следовательно, для построения универсальной модели объекта управления необходимо воспользоваться уточненной теорией. Наибольшее распространение получил метод расчета динамики, описанный в [18], однако, его существенным недостатком является необходимость расчета проекций всех сил, приложенных к СК, на вертикальную и горизонтальную плоскости с последующим итерационным расчетом уравнивающих моментов, что в значительной степени увеличивает сложность разрабатываемой модели.

Для решения поставленной задачи применен метод Н.Е. Жуковского [7, 19]. Суть метода заключается в выводе уравнения баланса сил, приложенных к системе, условно находящейся в равновесии:

$$\sum_{i=1}^n G_i v_i \cos(\vec{G}_i, \vec{v}_i) = 0, \quad (3)$$

где G_i – силы, приложенные к уравновешенной системе; v_i – скорости точек приложения сил; $\vec{G}_i, \vec{v}_i$ – угол между векторами сил и скоростей точек приложения сил.

Схема приложения сил в различных точках СК с двуплечим балансиром представлена на рис. 5.

Момент на валу кривошипа рассчитывается как

$$M_{кр} = G_{ш} r. \quad (4)$$

Рис. 5. Схема приложения сил в различных точках СК с двухплечим балансирам: G_r , $G_{б1}$, $G_б$, G_t , $G_{бп}$, $G_{кр}$, $G_{кп}$ – вес головки, переднего плеча балансира, заднего плеча балансира, траверсы, балансирного противовеса, кривошипа, кривошипного противовеса, соответственно; l_r , $l_{б1}$, $l_б$, $l_{бп}$ – расстояния от оси качения балансира до центров масс головки балансира, переднего плеча балансира, заднего плеча балансира, балансирного противовеса, соответственно; $R_{кр}$, $r_{кр}$ – расстояния от оси вращения кривошипа до центров масс кривошипного противовеса и кривошипа, соответственно

Вал электродвигателя связан с кривошипом СК посредством клиноременной передачи, имеющей передаточный коэффициент i и КПД $\eta_{п}$, следовательно, момент сопротивления на валу электродвигателя M_c , а также полезная мощность двигателя $P_{п}$ определяются как [20]:

$$M_c = \frac{M_{кр}}{i_{п}\eta_{п}}; \quad (5)$$

$$P_{п} = \frac{M_{кр}\omega_{кр}}{\eta_{п}}. \quad (6)$$

Имитационная модель станка-качалки представлена на рис. 6.

Рис. 6. Имитационная модель станка-качалки: G_{sht} – усилие, действующее на шток; w_d – угловая скорость вращения вала двигателя; s_A – положение полированного штока; M_c – момент сопротивления на валу электродвигателя

Имитационная модель асинхронного электродвигателя

Для вычисления потребляемой приводом мощности необходимо привести математическое описание подсистемы «редуктор – электродвигатель – система управления». При этом управляющим воз-

действием является изменение частоты управляющего сигнала (частоты фазного напряжения на обмотках статора электродвигателя), возмущающим воздействием – изменение момента сопротивления на валу электродвигателя, реакцией системы на изменение входных воздействий является изменение частоты вращения вала электродвигателя.

Для определения потребляемой электродвигателем мощности в зависимости от изменения момента сопротивления на валу электродвигателя необходимо реализовать его Т-образную схему замещения (рис. 7).

Параметры схемы замещения, такие как X_1 , R_1 , X_{μ} , X_2' , R_2' , рассчитываются по методу, описанному в статье [21].

Рис. 7. Т-образная схема замещения асинхронного электродвигателя

Зависимость скольжения s от изменения момента сопротивления M_c определяется по формуле Клосса [22, 23]. Имитационная модель асинхронного электродвигателя представлена на рис. 8.

Рис. 8. Имитационная модель асинхронного электродвигателя: ω_d – угловая скорость вращения вала двигателя; f_y – частота управляющего сигнала, задаваемая системой управления; M_c – момент сопротивления на валу электродвигателя; P – мгновенное значение мощности

Результаты

Приведенные зависимости и методы легли в основу имитационной модели, описывающей УШГН (рис. 9). Реализация производилась с использованием среды программирования MATLAB/Simulink.

Представленная модель применима как для разработки алгоритма управления подачей УШГН на основе обработки сигнала ваттметрограммы, так и для разработки методов диагностики неисправностей штангового глубинного насоса.

Для разработки алгоритма управления необходимо рассмотреть поведение системы при неизменных параметрах объекта и системы управления при несоответствии скоростей притока и откачивания скважинной жидкости.

На рис. 10 представлены графики зависимостей различных параметров от времени, полученные с помощью разработанной модели.

На рис. 10, а начальное положение динамического уровня соответствует статическому уровню, давление на забое равно пластовому, соответственно скорость притока равна нулю, система находится в равновесии.

Рис. 9. Имитационная модель УШГН, включающая следующие узлы УШГН: скважина и пласт (Oil Well), штанговый глубинный насос (Sucker-rod pump), станок-качалка (Conventional pumping unit), электродвигатель (Asynchronous Motor)

Рис. 10. Графики зависимости средней за период качания балансира потребляемой приводом УШГН мощности $P(t)$, динамического уровня $H_{дин}(t)$ и скоростей v притока (сплошная линия) и откачивания скважинной жидкости

При откачивании жидкости с некоторой постоянной скоростью происходит снижение забойного давления вследствие увеличения динамического

уровня жидкости, что ведет к росту скорости притока. Графики зависимостей, приведенные на рис. 10, б, иллюстрируют ситуацию, в которой скорость откачивания скважинной жидкости несколько меньше скорости притока, что ведет к уменьшению динамического уровня и снижению скорости притока и дебита скважины.

Приведенные зависимости подтверждают выводы, представленные в работе [24], что подсистема «пласт – скважина – штанговый глубинный насос» является самоорганизующейся, поскольку при несоответствии скорости притока скорости откачивания происходит изменение динамического уровня, приводящее к изменению забойного давления и скорости притока. Спустя некоторое время происходит естественное выравнивание этих скоростей. Однако новое установившееся значение динамического уровня может отличаться от оптимального, что чревато негативными последствиями. При уменьшении динамического уровня уменьшается значение перепада давления Δp , что приводит к снижению притока жидкости и искусственному занижению дебита скважины. Увеличение динамического уровня приводит к соответствующему снижению давления на приеме глубинного насоса, что приводит к увеличению нагрузок на полированный шток. Также при значительном превышении скорости откачивания скорости притока может произойти снижение уровня жидкости до приема насоса, что приведет к срыву подачи [25]. Приведенные зависимости также показывают, что значение средней за период потребляемой мощности отражает изменение динамического уровня. Разрабатываемые алгоритмы управления УШГН должны учитывать данные особенности поведения системы при выводе скважины на режим.

Разработанная имитационная модель также позволяет производить исследования влияния различных неисправностей ШГН на форму ваттметрограммы, в частности: обрыв и отворот штанг, заклинивание плунжера в верхнем и нижнем положении, удар о приемный клапан, удар о верхнюю гайку, попадание газа в цилиндр насоса, утечка в приемном клапане, утечка в нагнетательном клапане, запарафинивание.

Метод ваттметрирования для диагностики неисправностей в отличие от динамометрирования в настоящее время является недостаточно изученным,

поэтому для изучения характерных признаков возникновения той или иной неисправности на ваттметрограмме необходимо строить вспомогательную динамограмму. В качестве примера на приведенных графиках отражены формы ваттметрограммы (рис. 11, а) и динамограммы (рис. 11, б), соответствующие нормальной работе ШГН (пунктирная линия), а также утечке в нагнетательном клапане (сплошная линия).

Рис. 11. Динамограммы (а) и ваттметрограммы (б), полученные с помощью имитационной модели

Заключение

Разработанная имитационная модель подробно описывает узлы установки штангового глубинного насоса для добычи нефти и позволяет исследовать систему при различных параметрах используемого оборудования и скважины. Модель обеспечивает логику работы замкнутой системы, что необходимо для разработки алгоритмов управления на основании исследования полученных зависимостей. Также модель позволяет имитировать различные неисправности погружного оборудования с целью исследования влияния этих неисправностей на форму ваттметрограммы для разработки алгоритмов диагностики. Все перечисленные возможности модели необходимы для проведения исследований УШГН с целью разработки универсальных бездатчиковых систем управления.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках проекта ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям разви-

тия научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы», Соглашение № 14.574.21.0157 (уникальный идентификатор RFMEFI57417X0157).

Литература

1. Ивановский В.Н. Повышение интереса к штанговым насосным установкам – в чем причина? // Территория Нефтегаз. – 2013. – № 8. – С. 48–49.
2. Исмагулова А. И. Системы автоматического регулирования динамического уровня жидкости в скважине в штанговых глубинно-насосных установках // Инженерный вестник Дона. – 2012. – Т. 22, № 4. – С. 1–6.
3. Контроллеры автоматизации установок штанговых глубинных насосов / М.И. Хакимьянов, В.Д. Ковшов, А.М. Чикишев, Н.С. Максимов, А.И. Почуев // Нефтегазовое дело. – 2007. – № 1. – С. 1–20.
4. Хакимьянов М. И. Современные станции управления скважинными штанговыми глубинно-насосными установками // Нефтегазовое дело. – 2014. – Т. 12, № 1. – С. 78–85.
5. Сакаев А.Ф. Контроль и диагностика состояния оборудования штанговых глубинных насосов косвенным методом по ваттметрограмме с использованием искусственных нейронных сетей // Записки горного института. – 2007. – Т. 173. – С. 101–104.
6. Сагдатуллин А.М. Разработка математической модели системы автоматизации электропривода штанговой скважинной насосной установки // Территория Нефтегаз. – 2014. – № 4. – С. 28–35.
7. Сакаев А.Ф. Системы и алгоритмы энергосберегающего управления частотно-регулируемыми электроприводами штанговых скважинных насосных установок: дисс. ... канд. техн. наук. – СПб. гос. горный институт им. Г.В. Плеханова, 2009. – 148 с.
8. Хакимьянов М.И. Управление электроприводами скважинных насосных установок. – М.: Инфра-Инженерия, 2017 – 138 с.
9. Шагиев Р.Г. Исследование скважин по КВД. – М.: Наука, 1998. – 304 с.
10. Математическое моделирование эксплуатационной скважины в процессе оптимизации нефтедобычи / С.Г. Воронин, Д.А. Курносов, М.И. Корабельников, Д.В. Коробатов, В.В. Запунный // Вестник ЮУрГУ. Сер.: Энергетика. – 2005. – №9 (49). – С. 70–74.
11. Миклина О.А. Оценка притока нефти в гидродинамически совершенную скважину: метод. указания / О.А. Миклина, А.А. Мордвинов. – Ухта: УГТУ, 2016. – 22 с.
12. Садов В.Б. Оценка параметров нефтедобычи и управление насосной установкой с использованием динамограмм // Вестник Южно-Уральского гос. ун-та. Сер.: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. – 2013. – Т. 13, № 2. – С. 33–41.
13. Топольников А.С. Моделирование динамических нагрузок на полированный шток станка-качалки при неисправностях в работе штангового насоса // Труды Института механики им. Р.Р. Мавлютова, УНЦ РАН. – 2014. – Т. 10. – С. 95–101.
14. Уразаков К.Р. Математическая модель штанговой установки с эжектором для откачки газа из затрубного пространства / К.Р. Уразаков, В.А. Молчанова, А.С. Топольников // Интервал. Передовые нефтегазовые технологии. – 2007. – № 6. – С. 54–60.
15. Вирновский А.С. Теория и практика глубинно-насосной добычи нефти: Избранные труды. – М.: Недра, 1971. – 183 с.
16. Чичеров Л.Г. Глубинно-насосная добыча нефти / Л.Г. Чичеров, Н.Д. Дрэготеску. – М.: Недра, 1966. – 417 с.

17. Ивановский В.Н. Скажинные насосные установки для добычи нефти / В.Н. Ивановский, В.И. Дарищев, А.А. Сабиров, В.С. Каштанов. – М.: ГУП Изд-во «Нефть и газ» РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2002. – 824 с.

18. Чичеров Л.Г. Расчёт и конструирование нефтепромыслового оборудования.: учеб. пособие для вузов / Л.Г. Чичеров, Г.В. Молчанов, А.М. Рабинович и др. – М.: Недра, 1987. – 422 с.

19. Кореняко А.С. Теория механизмов и машин: учеб. – К.: Высш. шк., 1976. – 438 с.

20. Молчанов А.Г. Нефтепромысловые машины и механизмы / А.Г. Молчанов, В.Л. Чичеров. – М.: Недра, 1976. – 308 с.

21. Мощинский Ю.А. Определение параметров схемы замещения асинхронной машины по каталожным данным / Ю.А. Мощинский, В.Я. Беспалов, А.А. Кирякин // Электричество. – 1998. – Т. 34, № 98. – С. 38–42.

22. Лиходедов А.Д. Построение механической характеристики асинхронного двигателя и её апробация // Современные проблемы науки и образования. – 2012. – № 5. – С. 99.

23. Соловьев В.А. Расчет характеристик трехфазного асинхронного двигателя: методические указания к самостоятельной работе студентов по дисциплинам «Электротехника и электроника», «Основы привода». – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. – 44 с.

24. Садов В.Б. К вопросу автоматического управления приводом глубинного штангового насоса // Вестник Южно-Уральского гос. ун-та. Сер.: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. – 2013. – Т. 13, № 3. – С. 46–53.

25. Латыпов Б.М. Установка штангового винтового насоса для добычи нефти в осложненных условиях // Нефтегазовое дело – 2012. – Т. 10, № 1. – С. 13–15.

Торгаева Дарья Сергеевна

Мл. науч. сотр. лаб. цифровых систем управления
НИИ космических технологий (НИИ КТ) ТУСУРа
Ленина пр-т, д. 40, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: + 7-923-425-70-35
Эл. почта: belial1349@mail.ru

Сухоруков Максим Петрович

Зав. лаб. цифровых систем управления НИИ КТ ТУСУРа
Ленина пр-т, д. 40, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7 (382-2) 90-01-06
Эл. почта: max_sukhorukov@mail.ru

Шурыгин Юрий Алексеевич

Д-р техн. наук, проф., зав. каф. компьютерных систем
в управлении и проектировании (КСУП) ТУСУРа
Ленина пр-т, д. 40, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: + 7 (382-2) 51-05-30
Эл. почта: office@tusur.ru

Шиняков Юрий Александрович

Д-р техн. наук, директор НИИ КТ ТУСУРа
Ленина пр-т, д. 40, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: + 7 (382-2) 90-01-62
Эл. почта: shua@main.tusur.ru

Шалыпина Наталья Андреевна

Инж. лаб. цифровых систем управления
НИИ космических технологий ТУСУРа
Ленина пр-т, д. 40, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: + 7-952-806-37-26
Эл. почта: nat.shalyapina@gmail.com

Torgaeva D.S., Sukhorukov M.P., Shurygin Yu.A.,
Shinyakov Yu.A., Shalyapina N.A.

Simulation of a sucker rod pump for oil production

The paper is devoted to the development of a simulation model that describes the installation of a sucker rod pump as a closed-loop system. The development of the model was carried out with the aim of studying the influence of changes in the position of the dynamic level in the well annular and various faults of submersible equipment on the shape of the wattmeter card for the development of control algorithms and diagnostics of SRPU.

Keywords: simulation model, sucker rod pump, electromechanical drive, control system, wattmeter program, dynamic fluid level.

doi: 10.21293/1818-0442-2019-22-3-71-78

References

1. Ivanovsky V.N. *Povyshenie interesa k shtangovym nasosnym ustanovkam-v chem prichina?* [Increased interest in sucker rod pump installations – what is the reason?]. *Oil and Gas Territory*, 2013, no. 8, pp. 48–49 (in Russ.).
2. Ismagulova A.I. [Simulation of the design activity diversification of innovative enterprise]. *Engineering journal of Don*, 2012, vol. 22, no. 4-1, pp. 87–92 (in Russ.).
3. Hakim'janov M.I., Kovshov V.D., Chikishev A.M., Maksimov N.S., Pochuev A.I. *Kontrollery avtomatizatsii ustanovok shtangovykh glubinnyykh nasosov* [Controllers for automation of sucker rod pump installations]. *Petroleum engineering*, 2007, no. 1, pp. 1–20 (in Russ.).
4. Hakimyanov M.I. [Modern control stations for sucker rod pump units]. *Petroleum engineering*, 2014, vol. 12, no. 1, pp. 78–85 (in Russ.).
5. Sakaev A.F. *Kontrol' i diagnostika sostojaniya oborudovaniya shtangovykh glubinnyykh nasosov kosvennym metodom po vattmetrogramme s ispol'zovaniem iskusstvennykh nejronnykh setej* [Monitoring and diagnostics of the state of equipment of deep-well sucker-rod pumps by the indirect method according to the wattmeter program using artificial neural networks]. *Journal of Mining Institute*, 2007, vol. 173, pp. 101–104 (in Russ.).
6. Sagdatullin A.M. *Razrabotka matematicheskoy modeli sistemy avtomatizatsii jelektroprivoda shtangovoj skvazhinnoj nasosnoj ustanovki* [Development of a mathematical model of an automation system for an electric drive of a sucker rod pumping unit] // *Oil and Gas Territory*, 2014, no. 4, pp. 28–35 (in Russ.).
7. Sakaev A.F. *Sistemy i algoritmy jenergosberegajushhego upravleniya chastotno-reguliruemymi jelektroprivodami shtangovykh skvazhinnykh nasosnykh ustanovok* [Systems and algorithms for energy-saving control of variable-frequency electric drives of sucker-rod pumping units. Cand. Diss.]. St. Petersburg, 2009, 149 p. (in Russ.).
8. Khakimyanov M.I. *Upravlenie jelektroprivodami skvazhinnykh nasosnykh ustanovok* [Control of electric drives of downhole pumping units]. M., Infra-Inzhenerija, 2017, 138 p. (in Russ.).

9. Shagiev R.G. *Issledovanie skvazhin po KVD* [KVD well research]. M., Nauka, 1998, 304 p.
10. S.G. Voronin, D.A. Kurnosov, M.I. Korabelnikov, D.V. Korobatov, V.V. Zapunny *Matematicheskoe modelirovanie jekspluatacionnoj skvazhiny v processe optimizacii neftedobychi* [Mathematical modeling of production wells in the process of optimizing oil production]. *Vestnik JuUrGU. Serija: Jenergetika*, 2005, no. 9(49), pp. 70–74 (in Russ.).
11. Miklina, O.A. *Ocenka pritoka nefi v gidrodinamicheski sovershennuju skvazhinu* [Estimation of oil inflow into a hydrodynamically perfect well]. Ukhta, USTU, 2016, 22 p. (in Russ.).
12. Sadov V.B. [Parameter estimation of an oil extracting and pump installation control with use of dynamometer cards]. *Bulletin of the South Ural State University: series «Computer technologies, automatic control & radioelectronics»*, 2013, vol. 13, no. 2, pp. 33–41 (in Russ.).
13. Topolnikov A. S. *Modelirovanie dinamicheskikh nagruzok na polirovannyj shtok stanka-kachalki pri neispravnostjah v rabote shtangovogo nasosa* [Modeling of dynamic loads on a polished rod of a pumping unit during malfunctions in the operation of a sucker rod pump]. *Trudy Instituta mehaniki im. RR Mavljutova UNC RAN*, 2014, vol. 10, pp. 95–101 (in Russ.).
14. Urazakov K.R. *Matematicheskaja model' shtangovoj ustanovki s jezhektorom dlja otkachki gaza iz zatrubnogo prostranstva* [Mathematical model of a rod installation with an ejector for pumping gas from the annulus]. *Advanced oil and gas technology*, 2007, no. 6, pp. 54–60 (in Russ.).
15. Virnovsky A.S. *Teorija i praktika glubinno-nasosnoj dobychi nefii: Izbrannye trudy* [Theory and practice of deep pumping oil production: Selected works]. Moscow, Nedra, 1971, 183 p. (in Russ.).
16. Chicherov L.G., Dragotescu N.D. *Glubinnonasosnaja dobycha nefii* [Deep pump oil production]. Moscow, Nedra, 1966, 417 p. (In Russ.).
17. Ivanovsky V.N. *Skvazhinnye nasosnye ustanovki dlja dobychi nefii* [Oil Well Pumping Units]. Moscow, GUP Izd-vo «Nefi' i gaz» RGU nefi i gaza im. IM Gubkina, 2002, 824 p. (in Russ.).
18. Chicherov L.G., Molchanov G.V., Rabinovich A.M. *Raschjot i konstruirovanie neftepromyslovogo oborudovanija.: Ucheb. Posobie dlja vuzov* [Calculation and design of oilfield equipment.: Textbook. Manual for universities.]. Moscow, Nedra, 1987, 422 p. (in Russ.).
19. Korenyako A. S. *Teorija mehanizmov i mashin: uchebnik* [Theory of mechanisms and machines: a textbook]. K., Vysshaja shkola, 1976, 438 p. (in Russ.).
20. Molchanov A.G., Chicherov. V.L. *Neftepromyslovye mashiny i mehanizmy* [Oilfield machines and mechanisms]. Moscow, Nedra, 1976, 308 p. (In Russ.).
21. Moshchinsky Yu.A., Bepalov V.Ya., Kiryakin A.A. *Opredelenie parametrov shemy zameshhenija asinhronnoj mashiny po katalognym dannym* [Determination of the parameters of a circuit for replacing an asynchronous machine from catalog data]. *Electricity*, 1998, vol. 34, no. 98. pp. 38–42 (in Russ.).
22. Likhodedov A.D. [Construction of the mechanical characteristic of the asynchronous engine and its approbation]. *Modern problems of science and education*, 2012, no. 5, pp. 99 (In Russ.).
23. Soloviev V. A. *Raschet harakteristik trehfaznogo asinhronnogo dvigatelja: metodicheskie ukazanija k samostojatel'noj rabote studentov po disciplinam «Jeletrotehnika i jelektronika», «Osnovy privoda»* [Calculation of the characteristics of a three-phase asynchronous motor: guidelines for independent work of students in the disciplines «Electrical Engineering and Electronics», «Fundamentals of Drive»]. Moscow, Publishing House of MSTU. N.E. Bauman, 2014, 44 p. (in Russ.).
24. Sadov V.B. [To the question of automatic control of the drive sucker rod pump]. *Bulletin of the South Ural State University: series «Computer technologies, automatic control & radioelectronics»*, 2013, vol. 13, no. 3, pp. 46–53 (in Russ.).
25. Latypov B.M. [Progressing cavity pump for oil production under complicated conditions. *Petroleum Engineering*, 2012, vol. 10, no. 1, pp. 13–15 (in Russ.).

Daria S. Torgaeva

Junior Researcher, Laboratory of Digital Control Systems, Space Technology Research Institute, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR) 40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: + 7-923-425-70-35
Email: belial1349@mail.ru

Maxim P. Sukhorukov

Head of the Laboratory of Digital Control Systems, Space Technology Research Institute, TUSUR 40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7 (382-2) 90-01-06
Email: max_sukhorukov@mail.ru

Yury A. Shurygin

Doctor of Engineering Science, Professor, Head of the Department of Computer Control and Design Systems, TUSUR 40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: + 7 (382-2) 51-05-30
Email: office@tusur.ru

Yuriy A. Shinyakov

Doctor of Engineering Science, Professor, Director of the Scientific Research Institute of Space Technology, TUSUR 40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: + 7 (382-2) 90-01-62
Email: shua@main.tusur.ru

Natalia A. Shalyapina

Engineer, Laboratory of Digital Control Systems, Scientific Research Institute of Space Technology TUSUR 40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: + 7-952-806-37-26
Email: nat.shalyapina@gmail.com