

УДК 681.5
DOI: 10.18799/24131830/2025/5/4734
Шифр специальности ВАК: 2.8.4
Научная статья

Разработка методики уравнивания балансирного станка-качалки с роторными противовесами и определение ее работоспособности в ходе натурального эксперимента

Е.М. Солодкий✉, А.Б. Петроченков, С.Н. Кривощек, С.В. Сальников, Д.Д. Вишняков, Р.Ю. Юдин

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Россия, г. Пермь

✉wsdl00@gmail.com

Аннотация. *Актуальность* исследования заключается в необходимости повышения энергоэффективности эксплуатации нефтедобывающих скважин штанговыми глубинными установками. Учитывая тенденцию ежегодного роста средней обводненности продукции нефтедобывающих скважин, роста доли трудноизвлекаемых запасов и осложненного фонда, практическое внедрение методов снижения эксплуатационных затрат является важнейшей задачей современного нефтяного промысла России. В этом аспекте интеллектуализация систем управления, обработки информации и систем мониторинга позволяет повысить энергетическую эффективность отдельных элементов установки без изменения технологических параметров работы установки в целом. Отдельными элементами процесса оптимизации могут выступать электропривод и его системы управления, и кинематические величины станка-качалки. При этом трудно представить внедрение новых решений в кинематике балансирного станка-качалки, отличающихся от общепринятых. С точки зрения системы управления электроприводом существуют ограниченные возможности повышения энергоэффективности, что обуславливается узким диапазоном регулирования скорости. С другой стороны, параметры роторного противовеса значительно влияют на потребляемую электроприводом активную электрическую мощность. Таким образом, разработка алгоритмического обеспечения интеллектуальных станций управления штанговыми глубинными установками является актуальной задачей. **Цель:** формирование авторской методики уравнивания балансирного станка-качалки с роторным противовесом и проверка ее работоспособности в лабораторных условиях. **Методы** исследования основаны на использовании положений современной теории управления, теории автоматизированного электропривода, теории оптимизации, а также методов имитационного моделирования. **Результаты.** Предложена авторская методика нахождения оптимального уравнивания станка-качалки. Осуществлен теоретический расчет оптимального уравнивания для целевой нефтедобывающей скважины Уньвинского нефтяного месторождения, проведено натурное моделирование данного процесса на специально разработанном на базе Пермского национального исследовательского политехнического университета испытательном стенде. В результате проверки работоспособности разработанной методики на испытательном стенде зафиксировано снижение среднеквадратичного значения крутящего момента на 10,32 % за цикл качания и снижение потребления активной энергии на 7,15 %. **Выводы.** Практическое применение разработанного алгоритма позволит достичь значительного снижения потребляемой электроэнергии станком-качалкой. Разработанный алгоритм может быть реализован в качестве функции преобразователя частоты приводного электродвигателя штанговой скважинной насосной установки.

Ключевые слова: управление приводом, энергоэффективность, оптимизация работы станка-качалки, добыча нефти, асинхронный двигатель

Благодарности: Исследование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FSNM-2023-0005).

Для цитирования: Разработка методики уравнивания балансирного станка-качалки с роторными противовесами и определение ее работоспособности в ходе натурального эксперимента / Е.М. Солодкий, А.Б. Петроченков, С.Н. Кривощек, С.В. Сальников, Д.Д. Вишняков, Р.Ю. Юдин // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 5. – С. 174–182. DOI: 10.18799/24131830/2025/5/4734

UDC 681.5

DOI: 10.18799/24131830/2025/5/4734

Scientific paper

Development of a technique for balancing a rocking machine with rotary counterweights and determination of its operability during a field experiment

E.M. Solodkiy✉, A.B. Petrochenkov, S.N. Krivoshekoy,
S.V. Salnikov, D.D. Vishnyakov, R.Yu. Yudin

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

✉wsdl00@gmail.com

Abstract. Relevance. The need to improve the energy efficiency of oil production wells operation by rod deep installations. Taking into account the trend of annual growth in the average water content of oil production wells, an increase in the share of hard-to-recover reserves and a complicated fund, the practical implementation of methods to reduce operating costs is the most important task of the modern Russian oil industry. In this aspect, intellectualization of control systems, information processing and monitoring systems allow increasing the energy efficiency of individual elements of the unit, without changing the technological parameters of the unit as a whole. The electric drive and its control systems and kinematic values of the pumpjack can be considered as separate elements of optimization. It is difficult to imagine applying of new solutions in the kinematics of the pump unit that differ from the generally accepted ones. Considering the drive control system, there are limited opportunities to improve energy efficiency, because of limited speed control range. On the other hand, the parameters of the rotor counterweight significantly affect the active electric power consumed by the electric drive. Thus, the development of algorithmic solutions for intelligent control stations of pump units becomes an issue of the day. **Aim.** To form the author's methodology for balancing a rocking machine with a rotary counterweight and checking its operability in laboratory conditions. **Methods.** Research methods are based on the use of the provisions of modern control theory, automated electric drive theory, optimization theory, and simulation methods. **Results.** The authors have proposed the method of finding the optimal balancing of the rocking machine. The authors carried out the theoretical calculation of the optimal balancing for the target oil well of the Unvinskoye oil field and a full-scale simulation of this process on a test bench specially developed on the basis of Perm National Research Polytechnic University. As a result of checking the operability of the developed technique, a decrease in the root mean square torque value by 10.32% per swing cycle and a decrease in active energy consumption by 7.15% were recorded on the test bench. **Conclusion.** The practical application of the developed algorithm will allow achieving a significant reduction in the power consumption of the rocking machine. The developed algorithm can be implemented as a function of a frequency converter of a drive electric motor of a rod borehole pumping unit.

Keywords: drive control, energy efficiency, optimization of the rocking machine operation, oil production, induction motor

Acknowledgements: The research was funded by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project No. FSNM-2023-0005).

For citation: Solodkiy E.M., Petrochenkov A.B., Krivoshekoy S.N., Salnikov S.V., Vishnyakov D.D., Yudin R.Yu. Development of a technique for balancing a rocking machine with rotary counterweights and determination of its operability during a field experiment. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2025, vol. 336, no. 5, pp. 174–182. DOI: 10.18799/24131830/2025/5/4734

Введение

На сегодняшний день по результатам анализа эксплуатационного фонда скважин ООО «ЛУКОЙЛ-ПЕРМЬ» (активы на территории Пермского края) 65,9 % нефтедобывающих скважин эксплуатируются штанговыми скважинными насосными установками, а 31,3 % скважин – установками электроцентробежных насосов.

Вместе с широким распространением данного способа добычи остро стоит вопрос об энергоэф-

фективности процесса. В связи с динамичным развитием микропроцессорных систем управления электроприводом и преобразовательной техники все большее внимание уделяется вопросам энергоэффективности электропривода, в том числе электропривода в составе штанговой скважинной насосной установки (ШСНУ) [1–4]. В настоящее время актуальными стали вопросы оптимизации режимов работы и настройки систем управления электроприводом отдельного балансирующего станка-

качалки (СК). При таком подходе скорость откачки нефтяной жидкости стараются не менять, а энергетическая эффективность достигается настройкой контуров систем управления электроприводом [5, 6], а также внутрицикловым реагированием скорости [7] для снижения нагрузок на полированном штоке и в элементах четырехзвенного механизма СК [8, 9]. Оптимальное уравнивание СК является одним из возможных способов повышения эффективности работы установки за счет снижения циклового потребления электроэнергии. В промышленной практике, как правило, процессу уравнивания не уделяют должного внимания. Существует ряд методов обеспечения уравнивания СК с целью повышения энергетической эффективности работы установки. Такие методы позволяют достичь снижения удельного электропотребления в среднем на 4–21 % [10]. Большая часть таких методов сопряжена с анализом ваттметрграмм и профилей тока, который не формулирует четкого критерия для минимизации целевой функции энергопотребления за цикл качания [11, 12]. В данной работе предлагается сформулировать методику уравнивания балансирного СК с роторными противовесами, обеспечивающую минимизацию целевой функции энергопотребления.

Объекты и методика исследования

Для оптимизации электропотребления электропривода СК целесообразно ограничиться рассмотрением одного цикла качания. При этом активная энергия W , потребляемая из сети за цикл качания, может быть определена по формуле (1):

$$W = \int_0^{2\pi} \frac{T_L(\theta)\omega(\theta)}{\eta(\theta)} d\theta, \quad (1)$$

где θ – угол кривошипа, рад; $T_L(\theta)$ – нагрузочный момент на валу двигателя, Нм; $\omega(\theta)$ – угловая скорость ротора, рад/с; $\eta(\theta)$ – КПД двигателя, о. е.

Коэффициент полезного действия двигателя зависит от соотношения $\frac{P_2}{P_{2ном}}$, где $P_{2ном}$ – номинальная мощность, Вт; P_2 – механическая мощность на валу, Вт, которая зависит от скорости вала электропривода и нагрузочного момента, который определяется как (2):

$$T_L(\theta) = T_\omega + \frac{T_G(\theta)}{i}, \quad (2)$$

где i – передаточное число двухступенчатого редуктора; T_ω – момент холостого хода редуктора, Нм; $T_G(\theta)$ – момент на выходном валу редуктора от действия тангенциального усилия $F_t(\theta)$ на пальце кривошипа, Н.

Приводной двигатель СК испытывает на себе значительные знакопеременные нагрузки. В этих условиях оценка КПД затруднена ввиду характера

нагрузочного момента. Полагая что среднее значение КПД до и после уравнивания изменяется несущественным образом, а впоследствии данная величина может быть уточнена средствами имитационного моделирования, а также при допущении о том, что угловая скорость электродвигателя меняется незначительно, энергопотребление установки будет определяться профилем нагрузочного момента. С учетом введённых допущений минимум активной мощности, потребляемой из сети за цикл качения, обеспечивается минимизацией следующего критерия:

$$J(T_{MAX}) = (T_L(\theta) + T_{MAX} \sin(\theta))^2, \quad (3)$$

где T_{MAX} – максимальный момент роторного противовеса, Нм.

Оптимизация с выбранным критерием предполагает нахождение оптимального момента от роторного противовеса. Методика предложенного оптимального уравнивания заключается в следующей алгоритмической последовательности:

- 1) наблюдение электромагнитного момента двигателя;
- 2) оценка углового положения кривошипа θ ;
- 3) поиск T_{MAX} момента роторного противовеса.

Угловое положение кривошипа априори неизвестно ввиду отсутствия датчиков. Для наблюдения данного угла предлагается оригинальная методика, которая заключается в анализе электромагнитного момента приводного двигателя и его составляющей: а именно момента от усилия на полированном штоке $T_L(\theta)$. Поиск $T_L(\theta)$ сопряжен с анализом кинематики станка качалки, а значит, требует знания основных кинематических соотношений СК.

Для примера рассмотрим кинематическую схему балансирного СК (СК 8-3,5-4000) как четырехзвенного механизма, который состоит из приводного двигателя, ременной передачи, редуктора и кривошипного механизма. Упрощенная кинематическая схема установки и ее параметры представлены на рис. 1 и в таблице, соответственно.

Необходимые для расчета четырехзвенного механизма СК величины могут быть получены из уравнений (4)–(11), в которые входят кинематические параметры станка (рис. 2).

$$\alpha = \varphi - \theta + \beta + \psi, \quad (4)$$

$$\varphi = \frac{\pi}{2} - \arctan\left(\frac{l_2}{l_1}\right), \quad (5)$$

$$\psi = \begin{cases} \varepsilon - \xi, & \sin(\theta - \varphi) \geq 0 \\ \varepsilon + \xi, & \sin(\theta - \varphi) < 0 \end{cases}, \quad (6)$$

$$\beta = a \cos\left(\frac{C^2 + B^2 - J^2}{2CB}\right), \quad (7)$$

Таблица. Параметры станка качалки СК 8 3,5-4000
Table. Parameters of the rocking machine SK 8 3,5-4000

Параметр Parameter	Обозначение Designation	Величина/ Размерность Value/Dimension
Длина хода полированного штока Stroke length of the polished rod	D	1 м/м
Длина шатуна Connecting rod length	B	3 м/м
Длина переднего плеча балансира Length of the front shoulder of the balancer	A	3,5 м/м
Длина заднего плеча балансира Length of the rear arm of the balancer	C	2,5 м/м
Наибольший радиус кривошипа Largest crank radius	R	0,74 м/м
Расстояние между осью опоры балансира и осью ведомого вала редуктора по горизонтали Horizontal distance between the axis of the balancer support and the axis of the driven shaft of the gearbox	l_1	2,195 м/м
Расстояние между осью опоры балансира и осью ведомого вала редуктора по вертикали Vertical distance between the axis of the balancer support and the axis of the driven shaft of the gearbox	l_2	3 м/м
Максимальный момент роторного противовеса Maximum torque of the rotary counterweight	M_{cw}	36 кНм/кNm
Конструктивная неуравновешенность Constructive imbalance	F_{CU}	2350 кг/кг
Передаточное число ремённой передачи Belt drive ratio	i_1	5,3 отн. ед. relative units
Передаточное число редуктора Gear ratio of the gearbox	i_2	37,18 отн. ед. relative units

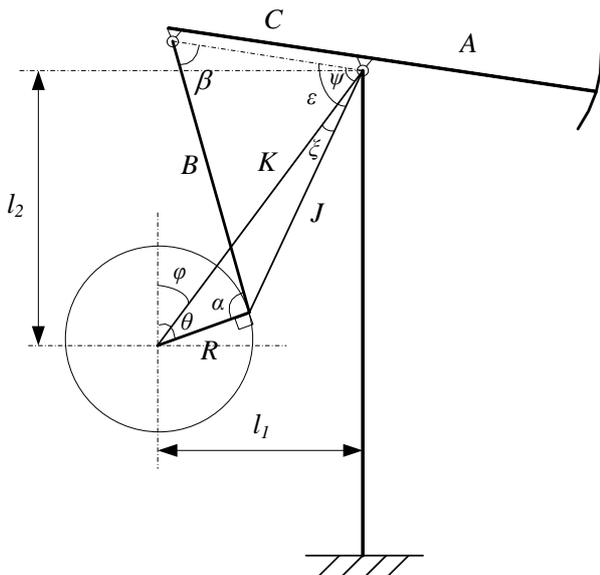


Рис. 1. Упрощенная кинематическая схема станка-качалки
Fig. 1. Simplified kinematic scheme of the rocking machine

$$\varepsilon = a \cos\left(\frac{C^2 + J^2 - B^2}{2CJ}\right), \quad (8)$$

$$\zeta = a \cos\left(\frac{K^2 + J^2 - R^2}{2KJ}\right), \quad (9)$$

$$J = \sqrt{K^2 + R^2 - 2KR \cos(\theta - \phi)}, \quad (10)$$

$$K = \sqrt{L_1^2 + L_2^2}, \quad (11)$$

где ϕ , K – кинематические константы, представленные на упрощенной схеме (рис. 1); α , β , ψ , ε , ζ , J – кинематические переменные, представленные на упрощенной схеме (рис. 1); R , C , B , l_1 , l_2 – параметры СК, используемые в вычислениях (таблица); θ – угол положения кривошипа, рад. Расчет угловых переменных и констант производится в радианах, переменных и констант расстояний – в метрах.

Момент на выходном валу редуктора, в свою очередь, определяется следующим выражением (12):

$$T_C = T_\lambda + T_{cw} + T_{J\Sigma}, \quad (12)$$

где T_λ – крутящий момент, обусловленный силой, приложенной в точке подвеса колонны штанг, Нм; T_{cw} – момент противовеса, Нм; $T_{cw} = T_M R \sin(\theta)$; T_M – максимальный момент противовеса, Нм; $T_{J\Sigma}$ – суммарный момент инерции, Нм, принимая во внимание, что скорость вращения двигателя изменяется незначительно $T_{J\Sigma} = 0$.

Величина T_λ определяется усилием в точке подвеса колонны штанг F_λ (13), конструктивной неуравновешенностью F_{CU} , кинематикой СК и кинематической переменной $k(\theta)$ (14):

$$T_\lambda = k(\theta)(F_\lambda - F_{CU}), \quad (13)$$

$$k(\theta) = \frac{RA \sin \alpha(\theta)}{C \sin \beta(\theta)}. \quad (14)$$

Так как в промышленных условиях момент нагрузки на валу двигателя не может быть определен путем прямого измерения, его оценка производится с помощью наблюдателя электромагнитного момента [13–16], основанного на статорной электромагнитной модели двигателя (15) (рис. 2).

$$\begin{cases} \frac{d\psi_{s\alpha}}{dt} = U_{s\alpha} - I_{s\alpha}R_s; \\ \frac{d\psi_{s\beta}}{dt} = U_{s\beta} - I_{s\beta}R_s; \\ T_e = \frac{3}{2}z_p(\psi_{s\alpha}I_{s\beta} - \psi_{s\beta}I_{s\alpha}), \end{cases} \quad (15)$$

где $\psi_{s\alpha}$, $\psi_{s\beta}$ – потокосцепления статора АД, Вб; $I_{s\alpha}$, $I_{s\beta}$ – статорные токи, А; $U_{s\alpha}$, $U_{s\beta}$ – статорные напряжения, В; R_s – активное сопротивление обмотки статора, Ом; (для двигателя, в дальнейшем

используемого на испытательном стенде Пермский национальный исследовательский политехнический университет, составляет 0,305 Ом); T_e – электромагнитный момент, Нм; Z_p – число пар полюсов.

Для оценки качества работы наблюдателя момента задавалось ступенчатое воздействие (в виде нагрузки на двигатель), равное 5 % от номинальной величины. Измерение проводилось на лабораторной установке, описание которой представлено ниже. Профиль наблюдаемого и измеренного с помощью датчика момента представлен на рис. 2. Так как данный наблюдатель чувствителен к изменению и точности задания параметров статорной цепи, то результат может быть зашумленным, для того чтобы нивелировать данное явление, был использован фильтр низких частот 3-го порядка с частотой среза 30 Гц.

Так как задача оценки крутящего момента на точке подвеса колонны штанг (ТПКШ) и момента, создаваемого роторным противовесом, сводится к

оценке углового положения θ , необходимо также знание угловой частоты вращения выводного вала редуктора ω и углового рассогласования между оценкой крутящего момента и фактическим положением роторного противовеса δ . Итоговая оценка может быть найдена как (16):

$$\theta = \omega t + \delta. \quad (16)$$

Оценка угловой частоты вращения выходного вала редуктора производится при помощи быстрого преобразования Фурье и выделения основной гармоники амплитудной частотной характеристики. Вместе с тем оценка углового рассогласования может быть получена исходя из закономерности о том, что $k(\theta)$ и T_λ имеют схожий характер и пересекают нуль при равных значениях угловых положений. Таким образом, алгоритм итеративного поиска углового рассогласования может быть представлен следующим образом (рис. 3).

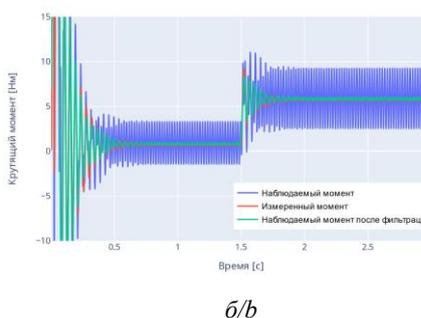
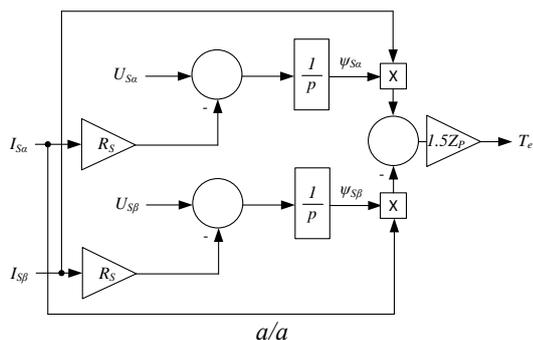


Рис. 2. Структурная схема наблюдателя электромагнитного момента (а) и профиль наблюдаемого крутящего момента (б) (синий), реальный момент, измеренный с помощью датчика момента (красный), и наблюдаемый момент, обработанный фильтром низких частот (зеленый)

Fig. 2. Block diagram of the electromagnetic torque observer (a) and the profile of the observed torque (b) (blue), the actual torque measured using a torque sensor (red) and the filtered observed torque (green)

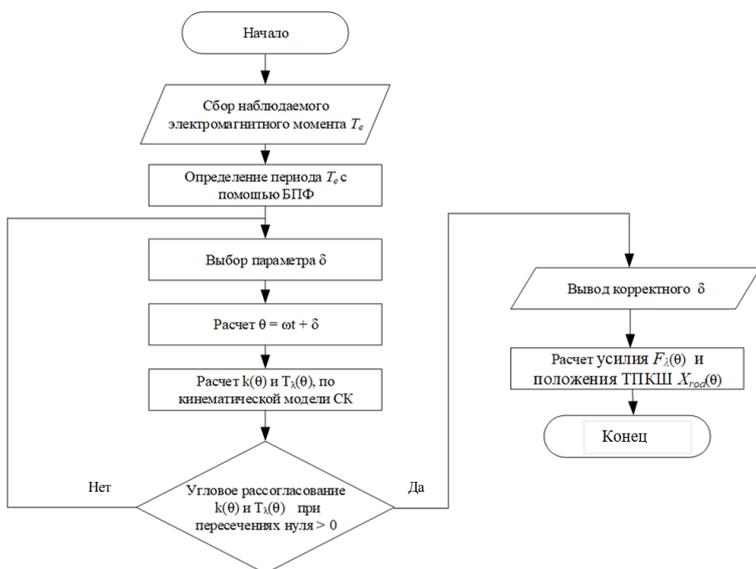


Рис. 3. Алгоритм поиска углового рассогласования наблюдаемого момента и реального положения роторного противовеса

Fig. 3. Algorithm for searching for the angular mismatch of the observed moment and the actual position of the rotary counterweight

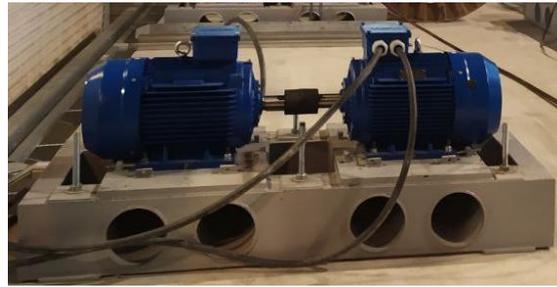
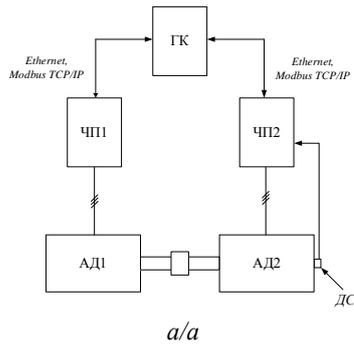


Рис. 4. Разработанный лабораторный испытательный стенд: а) структурная схема полунатурной модели ШСНУ; б) внешний вид испытательного стенда
Fig. 4. Developed laboratory test bench: a) block diagram of the semi-natural model of the sucker rod pump unit; b) test bench appearance

Результаты эксперимента

Для оценки эффективности предложенного метода был разработан лабораторный испытательный стенд (рис. 4), который включает в себя асинхронные двигатели с соединенными валами и преобразователи частоты:

- АД1 – асинхронный двигатель № 1, имитирующий функцию привода;
- АД2 – асинхронный двигатель № 2, имитирующий функцию нагрузки;
- ЧП1 – частотный преобразователь, управляющий АД1, также содержит наблюдатель электромагнитного момента;
- ЧП2 – частотный преобразователь двигателя АД2, выполняет функцию управления электромагнитным моментом посредством векторного принципа управления [17–19];
- ГК – главный контроллер, осуществляет функции вычисления нагрузочного момента для системы ПЧ2-АД2 по кинематической модели СК, динамограмме, а также угловому положению, полученному с ЧП2. Помимо этого, ГК осуществляет сбор технических параметров работы системы ЧП1-АД1;
- ДС – датчик скорости энкодерного типа.

В разработанном стенде использовались преобразователи частоты производства «НПФ Мехатроника-Про», г. Томск. Данные частотные преобразователи имеют открытую программную архитектуру и позволяют использовать алгоритмы собственной разработки для управления электроприводом с помощью программной среды MexBIOS Development Studio [20].

Для моделирования усилия на полированном штоке была использована динамограмма скважины № 250 нефтяного месторождения «Уньва» в Пермском крае. При этом стоит принять во внимание, что скважина, на которой была получена данная динамограмма, не испытывает каких-либо эксплуатационных осложнений и работает в номинальном режиме (рис. 5).

Оценка электромагнитного момента, полученная с ЧП1, передана на ГК, в котором был реализован алгоритм восстановления нагрузочных переменных СК, а также расчет оптимального уравнивания путем поиска T_{MAX} (3). Таким образом была получена рекомендация о снижении момента роторного противовеса с 36 до 32.6 кН·м. После установки нового значения было проведено повторное регулирование и замер потребленной активной энергии за равные промежутки времени при равных скоростях качания и нагрузке на ТПКШ (рис. 5).

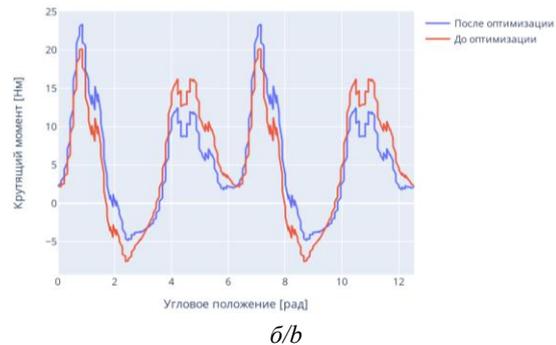
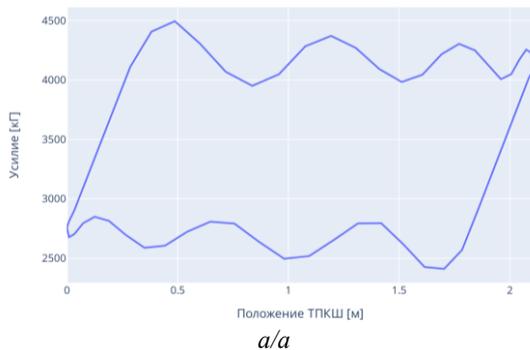


Рис. 5. Динамограмма работы рассматриваемой нефтедобывающей скважины (а) и результат оптимизации с помощью симплекс метода (б)
Fig. 5. Dynamogram of the operation of the oil well in question (a) and the result of optimization using the simplex method (b)

После оптимизации наблюдается неравенство пиков нагрузки при подъеме и спуске колонны штанг. Ввиду того, что целью оптимизации является поиск минимума среднеквадратичного момента на двигателе за цикл качания, обеспечивается и минимум потребления активной мощности из сети. Предметом дальнейших исследований может являться усовершенствование метода оптимизации с учетом контроля зоны отрицательного момента. Однако следует отметить, что в рассмотренном случае зона отрицательного момента на валу электродвигателя снизилась по длительности и глубине.

В результате замеров было выяснено, что вместе со снижением среднеквадратичного значения крутящего момента на 10,32 % за цикл качания была снижена и потребленная активная энергия на 7,15 %. Стоит отметить, что данные показатели будут зависеть от начальных условий работы установки.

Заключение

В работе рассмотрен метод оптимального уравнивания с помощью оценки переменных ШСНУ и разработан критерий оптимального уравнивания. Нагрузочный момент на валу двигателя, необходимый для расчета переменных ШСНУ был оценён при помощи наблюдателя момента, основанного на статорной модели двигателя. Также для подтверждения результатов было произведено имитационное

моделирование системы электропривода установки. Предложенный алгоритм позволил достичь значительного снижения потребленной электроэнергии, а также снизить отрицательные нагрузки на редуктор, что позволит сохранить его ресурс. Разработанный алгоритм может быть выполнен в качестве функции преобразователя частоты приводного электродвигателя ШСНУ. Очевидно, рекомендации об изменении максимального момента роторного противовеса могут быть использованы в процессе наладки или при модернизации установки.

Данные полунатурного моделирования показали существенное снижение энергозатрат (более 10 %) при неизменном режиме эксплуатации скважины. Снижение удельного энергопотребления на тонну добытой нефтяной жидкости при неизменной скорости откачки с использованием предложенной методики оптимального уравнивания зависит от текущей сбалансированности СК и его типа. Влияние изменения параметров роторного противовеса по предложенной методике на энергопотребление приводного электродвигателя зависит от ряда факторов, таких как тип СК, его начальное уравнивание, характер нагрузки на полированном штоке, и может быть получено по результатам замера моментограммы и численного моделирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Манахов В.А. Диагностика штанговой скважинной насосной установки методом спектрального анализа по параметрам ваттметрограммы // Диспетчеризация и управление в электроэнергетике. – 2022. – С. 184–187.
2. Владимиров О.В., Валиев А.И. Критерии эффективного и энергоэффективного управления процессом добычи нефти с непрерывным регулированием скорости асинхронного двигателя // Аллея науки. – 2020. – Т. 1. – № 12. – С. 335–338.
3. Оценка нагруженности гидравлических приводов штанговых скважинных насосных установок / Д. И. Шишляников, М.М. Тактев, А.А. Иванченко и др. // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2019. – № 4. – С. 34–39. DOI: 10.30713/0130-3872-2019-4-34-39
4. Оценка влияния уравниваемости привода ШСНУ на энергоэффективность установки / С.Л. Сабанов, А.С. Галеев, Г.И. Бикбулатова, Ю.А. Болтнева // Достижения, проблемы и перспективы развития нефтегазовой отрасли: материалы Международной научно-практической конференции. – Альметьевск, 25–28 октября 2017. – Альметьевск: Альметьевский государственный нефтяной институт, 2018. – Т. 2. – С. 354–359.
5. Software complex for sensorless control of an electrical submersible pump / R. Iudin, A. Petrochenkov, E. Solodkiy, D. Vishnyakov, B. Krause, S. Salnikov // IEEE Sensors Journal. – 2023. – P. 1. DOI: 10.1109/JSEN.2023.3331354
6. Teclé S.I., Ziuzev A.M., Kostylev A.V. Improving sucker rod pump efficiency using frequency controlled induction motor // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2022. – Т. 333. – № 11. – С. 140–148.
7. Солодкий Е.М. Управление штанговой скважинной насосной установкой для добычи нефти с наблюдателями переменных состояния технологического процесса: дис. ... канд. наук. – Пермь, 2020. – 145 с.
8. Вирновский А.С. Теория и практика глубинно-насосной добычи нефти. Избранные труды. – М.: Недра, 1971. – 183 с.
9. A comprehensive review of sucker rod pumps' components, diagnostics, mathematical models, and common failures and mitigations / S. Fakher, A. Khlaifat, M.E. Hossain et al. // Journal of Petroleum Exploration and Production Technology. – 2021. – Vol. 11. – № 10. – P. 3815–3839. DOI: 10.1007/s13202-021-01270-7
10. Яшин А.Н., Хакимьянов М.И. Уравниваемость установок скважинных штанговых насосов на основе анализа ваттметрограмм // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – № 8. – С. 36–44. DOI: 10.18799/24131830/2021/8/3303
11. Хакимьянов М.И., Пачин М.Г. Мониторинг состояния штанговых глубиннонасосных установок по результатам анализа ваттметрограмм // Электронный научный журнал Нефтегазовое дело. – 2011. – № 5. – С. 26–36.
12. Palka K., Czyz J.A. Optimizing downhole fluid production of sucker-rod pumps with variable motor speed // SPE Production & Operations. – 2009. – Vol. 24. – № 02. – P. 346–352. DOI: 10.2118/113186-MS
13. Анучин А.С. Системы управления электроприводов. – М.: МЭИ, 2015. – 378 с.
14. Finite control set model predictive torque control of induction machine with a robust adaptive observer / F. Wang, A. Davari, Z. Chen et al. // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2016. – Vol. 64. – № 4. – P. 2631–2641. DOI: 10.1109/TIE.2016.2529558

15. Калачев Ю.Н. Векторное регулирование. – М.: ЭФО, 2013. – 63 с.
16. Modern improvement techniques of direct torque control for induction motor drives-a review / N. El Ouanjli, A. Derouich, G. Abdelaziz et al. // Protection and Control of Modern Power Systems. – 2019. – Vol. 4. – № 2. – P. 1–12. DOI: 10.1186/s41601-019-0125-5
17. Review on model reference adaptive system for sensorless vector control of induction motor drives / R. Kumar, P. Syam, A. Chattopadhyay et al. // IET Electric Power Applications. – 2015. – Vol. 9. – № 7. – P. 496–511. DOI: 10.1049/iet-epa.2014.0220
18. Kim Y.R., Sul S.K., Park M.H. Speed sensorless vector control of induction motor using extended Kalman filter // IEEE Transactions on Industry Applications. – 1994. – Vol. 30. – № 5. – P. 1225–1233.
19. High-performance vector control without AC phase current sensors for induction motor drives: Simulation and real-time implementation / Y. Azzoug, M. Sahraoui, R. Pusca et al. // ISA transactions. – 2021. – Vol. 109. – P. 295–306.
20. Practice of using MexBIOS Development Studio technologies in educational process / E.M. Solodkiy, D.A. Dadenkov, A.A. Terehin, I.R. Yusupov // Proceedings of IX International Conference on Power Drives Systems (ICPDS). – Perm, Russia, 2016. – P. 1–5.

Информация об авторах

Евгений Михайлович Солодкий, кандидат технических наук, доцент кафедры микропроцессорных средств автоматизации Пермского национального исследовательского политехнического университета, Россия, 614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29. wsdl00@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-1450-8641>

Антон Борисович Петроченков, доктор технических наук, профессор кафедры микропроцессорных средств автоматизации Пермского национального исследовательского политехнического университета, Россия, 614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29. pab@msa.pstu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0808-351X>

Сергей Николаевич Кривошеков, кандидат технических наук, доцент кафедры геологии нефти и газа Пермского национального исследовательского политехнического университета, Россия, 614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29. krivoshchekov@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-9748-6291>

Савелий Витальевич Сальников, инженер кафедры микропроцессорных средств автоматизации Пермского национального исследовательского политехнического университета, Россия, 614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29. savelii_salnikov@ Rambler.ru, <https://orcid.org/0009-0009-4857-2263>

Денис Дмитриевич Вишняков, учебный мастер кафедры микропроцессорных средств автоматизации Пермского национального исследовательского политехнического университета, Россия, 614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29. vdd11@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3025-2383>

Ростислав Юрьевич Юдин, инженер I категории кафедры микропроцессорных средств автоматизации Пермского национального исследовательского политехнического университета, Россия, 614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29. RJuJudin@pstu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3496-5092>

Поступила в редакцию: 13.06.2024

Поступила после рецензирования: 04.07.2024

Принята к публикации: 02.04.2025

REFERENCES

1. Manakhov V.A. Diagnostics of the rod borehole pumping unit by the method of spectral analysis on the parameters of the wattmetrogram. *Dispatching and control in electric power engineering*, 2022, pp. 184–187. (In Russ.)
2. Vladimirov O.V., Valiev A.I. Criteria for effective and energy-efficient control of oil production process with continuous speed control of induction motor. *Science Alley*, 2020, vol. 1, no. 12, pp. 335–338. (In Russ.)
3. Shishlyannikov D.I., Taktev M.M., Ivanchenko A.A. Assessment of loading of hydraulic drives of rod well pumping units. *Construction of oil and gas wells onshore and offshore*, 2019, no. 4, pp. 34–39. (In Russ.) DOI: 10.30713/0130-3872-2019-4-34-39.
4. Sabanov S.L., Galeev A.S., Bikbulatova G.I., Boltneva Y.A. Evaluation of the impact of the balanced drive of the SHNU on the energy efficiency of the plant. *Proceedings of the International Scientific and Practical Conference*. Almeteyevsk, October 25–28, 2017. Almeteyevsk, Almeteyevsk State Petroleum Institute Publ., 2018. pp. 354–359. (In Russ.)
5. Iudin R., Petrochenkov A., Solodkiy E., Vishnyakov D., Krause B., Salnikov S. Software complex for sensorless control of an electrical submersible pump. *IEEE Sensors Journal*, 2023, pp. 1. DOI: 10.1109/JSEN.2023.3331354
6. Tecele S.I., Ziuzev A.M., Kostylev A.V. Improving sucker rod pump efficiency using frequency controlled induction motor. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2022, vol. 333, no. 11, pp. 140–148. DOI: 10.18799/24131830/2022/11/3955
7. Solodkiy E.M. *Control of a sucker rod well pumping unit for oil production with observers of technological process state variables*. Cand. Dis. Perm, 2020. 145 p. (In Russ.)
8. Virnovsky A.S. *Theory and practice of deep-pump oil production. Selected works*. Moscow, Nedra Publ., 1971. 183 p. (In Russ.)
9. Fakher S., Khlaifat A., Hossain M.E. A comprehensive review of sucker rod pumps' components, diagnostics, mathematical models, and common failures and mitigations. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 2021, vol. 11, no. 10, pp. 3815–3839. DOI: 10.1007/s13202-021-01270-7

10. Yashin A.N., Khakimyanov M.I. Balance of sucker rod pump units based on analysis of wattmetrograms. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 8, pp. 36–44. (In Russ.) DOI: 10.18799/24131830/2021/8/3303
11. Khakimyanov M.I., Pachin M.G. Condition monitoring of rod deep-pumping installations based on the results of wattmetrogram analysis. *Electronic scientific journal Neftegazovoe delo*, 2011, no. 5, pp. 26–36. (In Russ.)
12. Palka K., Czyz J.A. Optimizing downhole fluid production of sucker-rod pumps with variable motor speed. *SPE Production & Operations*, 2009, vol. 24, no. 02, pp. 346–352. DOI: 10.2118/113186-MS
13. Anuchin A.S. *Control systems of electric drives*. Moscow, MEI Publ., 2015. 378 p. (In Russ.)
14. Wang F., Davari A., Chen, Z. Finite control set model predictive torque control of induction machine with a robust adaptive observer. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2016, vol. 64, no. 4, pp. 2631–2641. DOI: 10.1109/TIE.2016.2529558
15. Kalachev Y.N. *Vector regulation*. Moscow, EFO Publ., 2013. 63 p. (In Russ.)
16. El Ouanjli N., Derouich A., Abdelaziz G. Modern improvement techniques of direct torque control for induction motor drives-a review. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2019, vol. 4, no. 2, pp. 1–12. DOI: 10.1186/s41601-019-0125-5
17. Kumar R., Syam P., Chattopadhyay A. Review on model reference adaptive system for sensorless vector control of induction motor drives. *IET Electric Power Applications*, 2015, vol. 9, no. 7, p. 496–511. DOI: 10.1049/iet-epa.2014.0220
18. Kim Y.R., Sul S.K., Park M.H. Speed sensorless vector control of induction motor using extended Kalman filter. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1994, vol. 30, no. 5, pp. 1225–1233.
19. Azzoug Y., Sahraoui M., Pusca R. High-performance vector control without AC phase current sensors for induction motor drives: simulation and real-time implementation. *ISA transactions*, 2021, vol. 109, pp. 295–306.
20. Solodkiy E.M., Dadenkov D.A., Terehin A.A., Yusupov I.R. Practice of using MexBIOS Development Studio technologies in educational process. *Proceedings of IX International Conference on Power Drives Systems (ICPDS)*. Perm, Russia, 2016. pp. 1–5.

Information about the authors

Evgeny M. Solodkiy, Cand. Sc., Associate Professor, Perm National Research Polytechnic University, 29, Komsomolsky avenue, Perm, 614990, Russian Federation. wsl00@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-1450-8641>

Anton B. Petrochenkov, Dr. Sc., Professor, Perm National Research Polytechnic University, 29, Komsomolsky avenue, Perm, 614990, Russian Federation. pab@msa.pstu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0808-351X>

Sergey N. Krivoshchekov, Cand. Sc., Associate Professor, Perm National Research Polytechnic University, 29, Komsomolsky avenue, Perm, 614990, Russian Federation. krivoshchekov@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-9748-6291>

Savely V. Salnikov, Engineer, Perm National Research Polytechnic University, 29, Komsomolsky avenue, Perm, 614990, Russian Federation. savelii_salnikov@rambler.ru, <https://orcid.org/0009-0009-4857-2263>

Denis D. Vishnyakov, Educational Master, Perm National Research Polytechnic University, 29, Komsomolsky avenue, Perm, 614990, Russian Federation. vdd11@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3025-2383>

Rostislav Yu. Yudin, Engineer of the I category, Perm National Research Polytechnic University, 29, Komsomolsky avenue, Perm, 614990, Russian Federation. RJuJudin@pstu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3496-5092>

Received: 13.06.2024

Revised: 04.07.2024

Accepted: 02.04.2025