

УДК 621.313:621.316:621.643

DOI: 10.24160/1993-6982-2020-1-49-54

Способ эффективного управления электроприводом штангового глубинного насоса

А.Н. Ладыгин, Д.Д. Богаченко, Н.А. Ладыгин, В.В. Холин

Представлены результаты разработки нового способа управления частотно-регулируемым электроприводом штангового глубинного насоса (ШГН) с асинхронным двигателем. Цель разработки — повышение энергетической эффективности работы электропривода ШГН за счет снижения потребления электроэнергии в рабочем цикле. Снижение энергопотребления обеспечивается посредством использования кинетической энергии неуравновешенных механических частей насоса, которые совершают возвратно-поступательное движение в вертикальной плоскости. Для реализации указанного принципа в электроприводе ШГН, работающего по системе преобразователь частоты – асинхронный двигатель, предложено использовать не постоянный сигнал задания на скорость вращения вала двигателя, а периодически меняющийся сигнал.

Дано аналитическое обоснование эффективности подобного решения, основанное на учете баланса кинетической и потенциальной энергий в рабочем цикле перемещения штанги глубинного насоса. Приведены математические выражения, исходя из которых должен формироваться требуемый сигнал задания скорости, обеспечивающий снижение потребления электроэнергии электроприводом насоса. Схематически ожидаемый эффект может быть обеспечен путем применения специального вычислительного устройства (контроллера), подключенного к управляющему входу преобразователя частоты электропривода насоса. Он будет выполнять функцию специализированного задачика скорости движения штанги и поршня. Устройство должно быть дополнено датчиком положения, установленным на валу кривошипа установки ШГН и передающим сигнал о направлении движения штанги насоса в контроллер задачика скорости. При опускании штанги насоса задание скорости будет плавно увеличиваться, обеспечивая рост запаса кинетической энергии, а при подъеме штанги — плавно уменьшаться, обеспечивая полезный расход запасенной кинетической энергии. Таким образом, при использовании предлагаемого способа управления уменьшается поток энергии, проходящий через двигатель и преобразователь частоты при неизменном объеме механической работы насоса. Именно этим и определяется повышение энергоэффективности технологической установки.

Ключевые слова: частотно-регулируемый электропривод, преобразователь частоты, штанговый глубинный насос, энергоэффективность.

Для цитирования: Ладыгин А.Н., Богаченко Д.Д., Ладыгин Н.А., Холин В.В. Способ эффективного управления электроприводом штангового глубинного насоса // Вестник МЭИ. 2020. № 1. С. 49—54. DOI: 10.24160/1993-6982-2020-1-49-54.

A Method for Efficiently Controlling the Sucker-Rod Pump Electric Drive

A.N. Ladygin, D.D. Bogachenko, N.A. Ladygin, V.V. Kholin

The results from elaborating a new method for controlling the sucker-rod pump (SRP) frequency-regulated electric drive equipped with an induction motor are presented. The aim of the study is to achieve better energy efficiency of the SRP electric drive operation due to a smaller amount of electricity consumed in the working cycle. Smaller energy consumption is achieved by using the kinetic energy of the pump's unbalanced mechanical parts which make reciprocating movement in a vertical plane. To implement this principle in the pump electric drive operating as a frequency converter - induction motor system, it is proposed to use a periodically varying motor shaft rotation frequency reference signal instead of a constant signal.

The efficiency of such solution is analytically substantiated by taking into account the balance of kinetic and potential energy in the SRP bar working movement cycle. Mathematical expressions proceeding from which the required speed reference signal ensuring smaller electricity consumption by the pump electric drive should be produced are given. One possible circuit solution using which the expected effect can be obtained implies the use of a dedicated computing device (controller) connected to the pump electric drive frequency converter's control input. This device will perform the function of a dedicated adjuster for the pump rod and piston motion speeds. The device should be supplemented with a position sensor installed on the SRP crankshaft, which will transmit the pump rod motion direction signal to the speed adjusting controller. When the pump rod moves downward, the speed reference signal will smoothly increase, thus resulting in a growth of stored kinetic energy, and when the rod moves upward, the speed reference signal will smoothly decrease, due to which the stored kinetic energy will be usefully consumed. Thus, in using the proposed control method, it becomes possible to decrease the flow of energy passing through the motor and frequency converter with the pump mechanical work remaining unchanged. It is exactly owing to this circumstance that better energy efficiency of the process installation is obtained.

Key words: frequency-regulated electric drive, frequency converter, sucker-rod pump, energy efficiency.

For citation: Ladygin A.N., Bogachenko D.D., Ladygin N.A., Kholin V.V. A Method for Efficiently Controlling the Sucker-Rod Pump Electric Drive. Bulletin of MPEI. 2020;1:49—54. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2020-1-49-54.

Введение

В настоящее время одним из основных методов добычи нефти является добыча ее из скважин с помощью штанговых глубинных насосов (ШГН), обладающих более высоким коэффициентом полезного действия (КПД), чем центробежные погружные насосные установки, а при определенных геологических условиях являющихся единственным приемлемым типом нефтяного насоса [1].

Широкое распространение ШГН и непрерывный рост стоимости электроэнергии обусловили актуальность поиска путей повышения энергоэффективности данных установок, приводимых в движение электроприводом [2, 3]. Известно, что наибольшая доля потребления энергии при нефтедобыче приходится на установки ШГН, поэтому даже небольшой рост их энергоэффективности даст значительный экономический эффект.

Особенности работы привода установки штангового глубинного насоса и принципиальная возможность снижения энергозатрат

Внешний вид типичной установки ШГН представлен на рис. 1, а ее функциональная схема приведена на рис. 2. Установка состоит из механической конструкции, содержащей собственно глубинный насос и наземное оборудование, и электропривода, приводящего механизм в движение. Штанговый глубинный насос выглядит как поршневой насос, выполненный в виде трубы 1 длиной 2...4 м, внутри которой перемещается поршень-плунжер 2 длиной 1...1,5 м. Плунжер посредством штанги 3, расположенных в колонне труб 4, через шток 5 крепится к головке балансира 6 станка-качалки. Балансир приводится в движение приводным электродвигателем 7. Вращательное движение вала электродвигателя передается балансиру через ременную передачу, редуктор 8 и кривошипно-шатунную пару 9. Таким образом, вращательное движение кривошипа преобразуется в возвратно-поступательное движение



Рис. 1. Установка ШГН

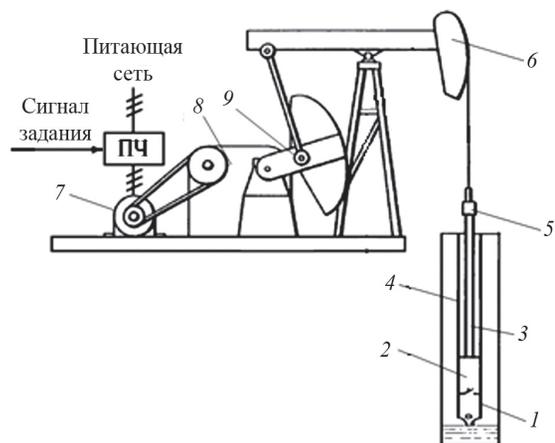


Рис. 2. Функциональная схема типовой установки ШГН:

1 — поршневой насос; 2 — поршень-плунжер; 3 — штанги; 4 — колонна труб; 5 — шток; 6 — балансир; 7 — электродвигатель; 8 — редуктор; 9 — кривошипно-шатунная пара

балансира, штанг и плунжера глубинного насоса. На валу кривошипа, как правило, имеется дополнительный балансир.

Электропривод современных установок ШГН представляет собой систему преобразователь частоты — асинхронный двигатель (ПЧ–АД) [4, 5], позволяющую плавно регулировать частоту качаний и производительность насоса. Хорошо известно, что данная функция электропривода очень важна для ШГН, поскольку требуемое значение средней скорости электродвигателя, определяющее частоту качаний ШГН, на практике необходимо варьировать в зависимости от геологических характеристик скважины.

Следует заметить, что при рассматриваемой конструкции насоса механическая нагрузка его электропривода в течение рабочего цикла имеет явно выраженный переменный характер [6]. Эта особенность нагрузки объясняется (среди прочих причин) наличием неуравновешенных масс в конструкции установки ШГН, которые требуется поднимать и опускать на каждом цикле качания. Таким образом, в нагрузочной диаграмме электродвигателя появляются максимумы, для преодоления которых нужна достаточная перегрузочная способность электропривода, как правило, не менее двух. Данное требование приводит к необходимости завышения установленной мощности электропривода.

Совершенно очевидно, что в снижении амплитуды колебаний момента нагрузки на валу электродвигателя заключен серьезный потенциал снижения установленной мощности самого электропривода. Одновременно можно рассчитывать на снижение потребления электроэнергии на единицу объема добытой нефти.

Принципиальная возможность снижения амплитуды колебаний механического момента на валу привода

появляется, если при подъеме масс на каждом рабочем цикле использовать кинетическую энергию этих же неуравновешенных масс. Иными словами, чтобы снизить пик механического момента на валу электродвигателя на рабочем цикле, необходимо допустить снижение скорости движения на соответствующей части цикла. Эффективным техническим средством решения такой задачи регулирования будет система ПЧ–АД, которой оснащена установка.

Реализация метода энергоэффективного управления электроприводом штангового глубинного насоса

Рассмотрим аналитическое обоснование возможности выравнивания момента нагрузки на валу электродвигателя посредством использования кинетической энергии неуравновешенных движущихся частей нефтяного насоса-качалки.

Компенсация потенциальной энергии $\Delta W_{\text{пот}}$, требуемой от электропривода для подъема неуравновешенных частей (масс) работающей насосной установки, возможна тем же количеством кинетической энергии $\Delta W_{\text{кин}}$. Эту энергию можно получить, если при подъеме неуравновешенных масс допустить уменьшение угловой скорости кривошипа ω на величину $\Delta\omega$. Разумеется, следует обеспечить возможность последующего увеличения угловой скорости кривошипа на величину $\Delta\omega$ (восстановления потерянной кинетической энергии) при опускании тех же неуравновешенных масс. Соответствующий график рассматриваемых изменений угловой скорости кривошипа изображен на рис. 3.

Для реализации указанного графика важно найти значения ускорений на участках изменения угловой скорости. Рассмотрим аналитические зависимости, позволяющие вычислять ускорения, соответствующие скоростному режиму установки ШГН.

Нетрудно определить, что изменение кинетической энергии за счет уменьшения угловой скорости на $\Delta\omega$ определяется как:

$$\Delta W_{\text{кин}} = J\omega_{\text{ср}}\Delta\omega, \quad (1)$$

где J — приведенный к кривошипу момент инерции несбалансированного груза; $\omega_{\text{ср}}$ — среднее значение

угловой скорости кривошипа за цикл работы насоса; $\Delta\omega$ — изменение угловой скорости кривошипа в процессе подъема или опускания штанг.

Изменение потенциальной энергии неуравновешенных частей установки при подъеме штанг насоса (на половине цикла качания) определяется формулой:

$$\Delta W_{\text{пот}} = 2mgR, \quad (2)$$

где m — масса несбалансированных частей установки, приведенная к оси кривошипа; g — ускорение свободного падения; R — приведенный к кривошипу радиус вращения несбалансированных частей установки.

Из условия равенства приращений потенциальной (2) и кинетической (1) энергий получим соответствующее значение уменьшения скорости вращения кривошипа:

$$\Delta\omega = \frac{2mgR}{J\omega_{\text{ср}}}.$$

Время подъема $t_{\text{под}}$ (опускания $t_{\text{оп}}$) штанг определяется величиной средней угловой скорости $\omega_{\text{ср}}$:

$$t_{\text{под}} = t_{\text{оп}} = \pi/\omega_{\text{ср}}.$$

Искомое угловое ускорение (замедление) кривошипа при подъеме (при опускании меняется только знак ускорения) штанг равно:

$$\varepsilon = \frac{\Delta\omega}{t_{\text{под}}} = \frac{\Delta\omega\omega_{\text{ср}}}{\pi} = \frac{2mgR}{\pi J}. \quad (3)$$

Таким образом, для реализации выравнивания момента нагрузки на валу электродвигателя посредством использования кинетической энергии необходимо циклически менять скорость вращения кривошипа с ускорением, согласно (3). С такой задачей вполне справится электропривод по схеме ПЧ–АД, которым оснащена установка ШГН, если в систему управления добавить соответствующий задатчик скорости вращения двигателя.

Помимо специализированного датчика при технической реализации предлагаемого циклического изменения скорости необходимо использовать датчик положения кривошипа, который следует установить на валу кривошипа ШГН. Он может иметь сравнительно простую конструкцию, поскольку от него требуются

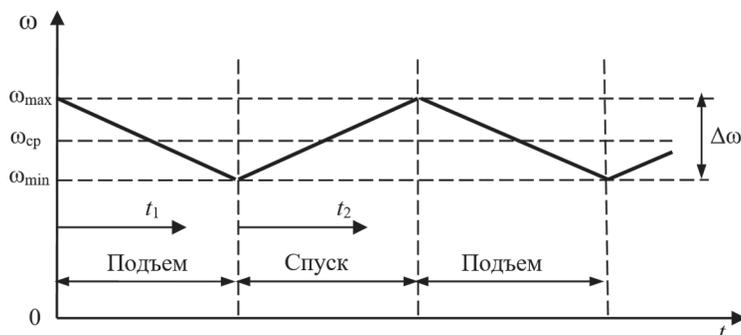


Рис. 3. График скорости вращения кривошипа установки ШГН в цикле подъем – опускание штанг насоса

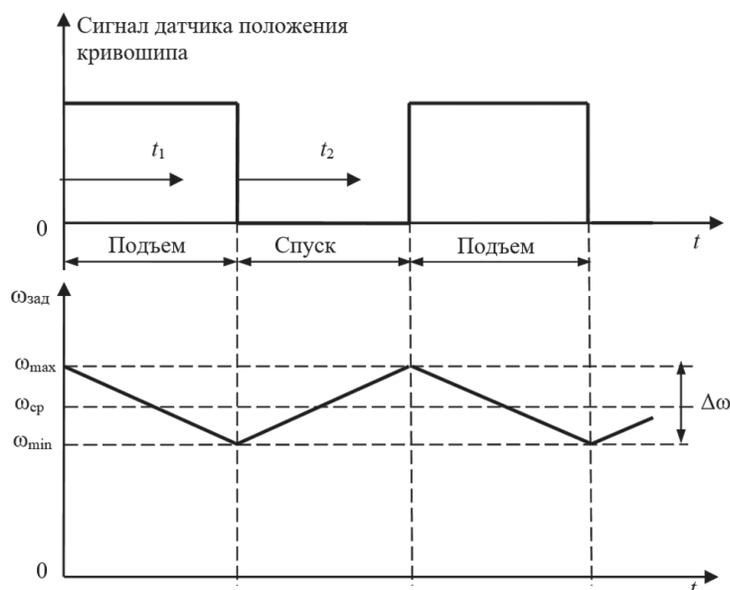


Рис. 4. График изменения заданной скорости вращения кривошипа установки ШГН в сочетании с сигналом датчика положения кривошипа

только данные с точностью до половины оборота кривошипа. Подъему штанг ШГН соответствует поворот оси кривошипа на половину оборота, а последующие поворота соответствуют опусканию штанг.

На рисунке 4 дан график требуемого сигнала задания угловой скорости кривошипа $\omega_{\text{зад}}$ при циклическом подъеме и опускании штанг, причем границы участков подъема и опускания определяются посредством команд с датчика положения, представленных на том же рисунке.

При подъеме и опускании штанг датчик положения, установленный на оси кривошипа ШГН, подает команды на формирование задания угловых скоростей кривошипа согласно выражениям:

$$\begin{aligned}\omega_{\text{зад}} &= \omega_{\text{max}} - \varepsilon t; \\ \omega_{\text{зад}} &= \omega_{\text{min}} + \varepsilon t,\end{aligned}$$

где t — время, отсчитываемое от момента начала подъема штанг; $\omega_{\text{max}} = \omega_{\text{ср}} + \Delta\omega/2$, $\omega_{\text{min}} = \omega_{\text{ср}} - \Delta\omega/2$ — задание скорости на входе преобразователя частоты в моменты начала подъема и опускания штанг.

Представленный на рис. 4 график демонстрирует изменение скорости кривошипа в диапазоне шириной $\Delta\omega$ в пределах от ω_{max} до ω_{min} . Этим обеспечиваются колебания кинетической энергии, равные изменению потенциальной энергии штанг глубинного насоса. В результате колебания потенциальной энергии штангового глубинного насоса компенсируются не за счет электроэнергии, получаемой из питающей сети, а за счет колебаний кинетической энергии. Таким образом осуществляется использование кинетической энергии опускающихся штанг для их последующего подъема

путем управления скоростью двигателя с определенным темпом замедления при движении штанг вверх и темпом ускорения при движении штанг вниз.

Функциональная схема усовершенствованной установки ШГН, в которой реализуется предлагаемый энергоэффективный способ управления частотно-регулируемым электроприводом, приведена на рис. 5. Принципиальным отличием указанной схемы является применение в электроприводе вычислительного блока (ВБ) и датчика положения, который установлен на валу кривошипа установки. Рассматриваемый вычислительный блок работает как специализированный задатчик скорости движения штанг и поршня насоса. Важно, чтобы алгоритм работы задатчика соответствовал приведенным зависимостям и был согласован с датчиком направления движения штанг насоса

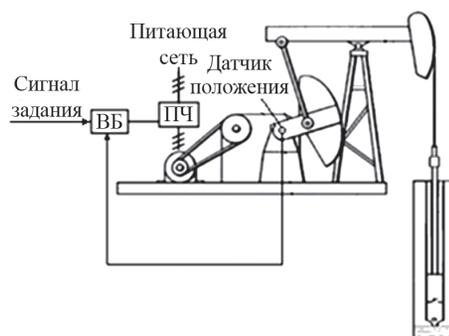


Рис. 5. Функциональная схема усовершенствованной установки ШГН с энергоэффективным управлением частотно-регулируемым электроприводом

Усовершенствованная схема функционирует следующим образом. На управляющий вход вычислительного блока ВБ подаются сигнал задания средней угловой скорости $\omega_{\text{ср}}$ кривошипа и сигнал с датчика положения. При подъеме штанги глубинного насоса с датчика положения поступает сигнал логической единицы. При этом вычислительный блок уменьшает значение сигнала задания угловой скорости вращения кривошипа с постоянным темпом ϵ (см. рис. 4), а при опускании штанги глубинного насоса с датчика положения поступает сигнал логического нуля. Вычислительный блок увеличивает значение сигнала задания угловой скорости вращения кривошипа с постоянным темпом ϵ .

Заключение

Применив предложенное усовершенствование установки ШГН, можно реализовать энергоэффективное управление электроприводом установки. Указанное управление приводит к снижению амплитудных значений пульсирующей нагрузки электропривода и энергопотребления за счет уменьшения среднеквадра-

точных потерь. Использование предлагаемого способа приводит к уменьшению потока энергии, проходящей через преобразователь и двигатель, что позволяет снизить их установленную мощность.

Заметим, что на обоснованности сделанных выводов не сказывается учет нагрузки электропривода, вызываемой силами трения при работе установки, поскольку анализировались только затраты энергии на перемещение неуравновешенных масс установки.

Следует подчеркнуть, что предлагаемый подход к управлению электроприводом, основанный на циклическом преобразовании потенциальной и кинетической энергий, может быть реализован не только в установках ШГН, а эффективно применен на любых технологических установках, в которых вращательное движение вала двигателя преобразуется в возвратно-поступательное движение неуравновешенных масс установки. Примерами подобных установок являются прессы и штамповочные машины, качающиеся пилы и др. Представленный способ управления защищен патентом РФ на изобретение [7].

Литература

1. **Хакимьянов М.И., Шафиков И.Н.** Анализ потребления электроэнергии при механизированной добыче нефти электроцентробежными насосами // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2013. Т. 9. № 3. С. 37—41.
2. **Brandt A.R.** Oil Depletion and the Energy Efficiency of Oil Production: The Case of California // Sustainability. 2011. V. 3. No. 10. Pp. 1833—1854.
3. **Vazquez M. e. a.** Global Optimization of Oil Production Systems. A Unified Operational View // Proc. SPE Ann. Techn. Conf. and Exhibition. Soc. of Petroleum Eng., 2001.
4. **Langbauer C., Winkler T.** Frequency Elastic Drive System Operation Of Sucker Rod Pumping System // Proc. 17th Intern. Ural Conf. AC Electric Drives (ACED). 2018. Pp. 1—5.
5. **Khakimyanov M.I., Shafikov I.N., Khusainov F.F.** Control Of Sucker Rod Pumps Energy Consumption // Intern. Siberian Conf. Control and Communications. 2015. Pp. 1—4.
6. **Шабанов В.А.** Основы регулируемого электропривода основных механизмов бурения, добычи и транспорта нефти. Уфа: Изд-во УГНТУ, 2009. С. 123—136.
7. **Пат. № 2686304 РФ.** Способ управления частотно-регулируемым электроприводом штангового глубинного насоса с асинхронным двигателем / А.Н. Ладыгин, Д.Д. Богаченко, Н.А. Ладыгин, В.В. Холлин // Бюл. изобрет. 2019. № 12.

References

1. **Khakim'yanov M.I., Shafikov I.N.** Analiz Potrebieniya Elektroenergii pri Mekhanizirovannoy Dobyche Nefti Elektrotsentrobezhnyimi Nasosami. Elektrotekhnicheskie i Informatsionnye Kompleksy i Sistemy. 2013;9;3:37—41. (in Russian).
2. **Brandt A.R.** Oil Depletion and the Energy Efficiency of Oil Production: The Case of California. Sustainability. 2011;3;10:1833—1854.
3. **Vazquez M. e. a.** Global Optimization of Oil Production Systems. A Unified Operational View. Proc. SPE Ann. Techn. Conf. and Exhibition. Soc. of Petroleum Eng., 2001.
4. **Langbauer C., Winkler T.** Frequency Elastic Drive System Operation Of Sucker Rod Pumping System. Proc. 17th Intern. Ural Conf. AC Electric Drives (ACED). 2018: 1—5.
5. **Khakimyanov M.I., Shafikov I.N., Khusainov F.F.** Control Of Sucker Rod Pumps Energy Consumption. Intern. Siberian Conf. Control and Communications. 2015:1—4.
6. **Shabanov V.A.** Osnovy Reguliruемого Elektroprivoda Osnovnykh Mekhanizmov Bureniya, Dobychi i Transporta Nefti. Ufa: Izd-vo UGNTU, 2009:123—136. (in Russian).
7. **Pat. № 2686304 RF.** Sposob Upravleniya Chastotno-reguliruемым Elektroprivodom Shtangovogo Glubinnogo Nasosa s Asinkhronnym Dvigatелеm. A.N. Ladygin, D.D. Bogachenko, N.A. Ladygin, V.V. Kholin. Byul. Izobret. 2019;12. (in Russian).

Сведения об авторах:

Ладыгин Анатолий Николаевич — кандидат технических наук, профессор кафедры автоматизированного электропривода НИУ «МЭИ», e-mail: LadyginAN@mpei.ru

Богаченко Дмитрий Дмитриевич — кандидат технических наук, старший научный сотрудник кафедры автоматизированного электропривода НИУ «МЭИ»

Ладыгин Николай Анатольевич — директор по маркетингу и стратегии управления «Проекты через Партнеров» АО «Шнейдер Электрик», Москва

Холин Владимир Васильевич — кандидат технических наук, старший научный сотрудник кафедры автоматизированного электропривода НИУ «МЭИ»

Information about authors:

Ladygin Anatoliy N. — Ph.D. (Techn.), Professor of Electric Drives Dept., NRU MPEI, e-mail: LadyginAN@mpei.ru

Bogachenko Dmitriy D. — Ph.D. (Techn.), Senior Researcher of Electric Drives Dept., NRU MPEI

Ladygin Nikolay A. — Director of Marketing and Management Strategy «Projects Through Partners», JSC «Schneider electric», Moscow

Kholin Vladimir V. — Ph.D. (Techn.), Senior Researcher of Electric Drives Dept., NRU MPEI

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Conflict of interests: the authors declare no conflict of interest

Статья поступила в редакцию: 25.07.2019

The article received to the editor: 25.07.2019